

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Zkoušení pneumatických rotačních motorů

Testing of Pneumatic Rotary Motors

Student:

Bc. Škrabal Jiří

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Jaroslav Kopáček, Csc.

Ostrava 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Škrabal**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 16 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení
Téma: **Zkoušení pneumatických rotačních motorů**
Testing of Pneumatic Rotary Motors

Zásady pro vypracování:

Vypracujte projekt zkušebního zařízení pro měření pneumatického rotačního motoru s těmito parametry: max. výkon 0,2 kW, max. otáčky 1000 za minutu, max. moment 2Nm. V rámci projektu vypracujte:

1. přehled základních výpočtových parametrů pro rotační pneumatické pístové motory,
2. přehled snímačů veličin a parametrů pro měření na pneumomotoru – všeobecně a pro parametry zadaného pneumomotoru,
3. přehled možných brzdících systémů a konkrétně pro parametry zadaného pneumomotoru,
4. metodiku měření statických charakteristik pneumomotoru: momentu, výkonu, spotřeby, měrné spotřeby v závislosti na otáčkách motoru,
5. projekt zkušebního zařízení pro dané parametry a velikost motoru.

Seznam doporučené odborné literatury:

- KOPÁČEK, J. *Pneumatické mechanismy díl 1. – Pneumatické prvky a systémy*. Ostrava: VŠB-TUO, 1996. 267 s. ISBN 80-7078-306-0
- KOPÁČEK, J. *Technická diagnostika hydraulických mechanismů*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990.- 159 s. ISBN 80-03-00308-3
- Průručka měřicí techniky*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1965. 924 s.
- JENČÍK, J. KUHN, L. *Technická měření ve strojnictví*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982. 580 s.
- ZEHNULA, K. *Snímače neelektrických veličin*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983. 2. vyd. 371 s.
- BORISENKO, K.S. *Пневматические двигатели горных машин*. Moskva: Ugletěchizdat, 1958

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Jaroslav Kopáček, CSc.**

Konzultant diplomové práce: Ing. Lukáš Dvořák, Ph.D.

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012



prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21. května 2012

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické uložena v Ústřední knihovně VŠB - TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 11/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. května 2012

.....

Podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Jiří Škrabal

Adresa trvalého pobytu autora práce: Rozvadovice 28, 784 01 Litovel

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ŠKRABAL, J. Zkoušení pneumatických rotačních motorů: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2012, 62 s. Vedoucí práce: Kopáček, J.

Diplomová práce se zabývá zkoušením pneumatických rotačních motorů. První část práce obsahuje přehled vyráběných pneumatických rotačních motorů, včetně jejich výpočtů a charakteristik. V této části je také uveden výpočet vzdušníku. V dalších částech diplomové práce se zabývá výběrem snímačů a brzdícího zařízení pro parametry zadaného pneumatického motoru. V závěrečných částech je popsána metodika měření charakteristik a projekt zkušebního zařízení pro parametry zadaného motoru. V poslední části diplomové práce je provedeno experimentální měření, které je doplněno vyhodnocením z naměřených hodnot.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

ŠKRABAL, J. Testing of pneumatic rotary engines: Master Thesis. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, 2010, 62 p. Thesis head: Kopáček, J.

The *master thesis* deals with the testing of pneumatic rotary engines. The first part provides an overview of manufactured pneumatic rotary engines, including their calculations and their characteristics. This section also shows the calculation of their receiver. In other parts of the *master* deals with the selection of sensors and braking devices for the parameters of given pneumatic motor. In the final parts describes the methodology of measurement of the characteristics and project of tested equipment for parameters of given engine. In the last part of the *master* is done experimental measurement, which is completed by evaluation of measured values.

Obsah

ÚVOD	12
1 Přehled základních výpočtových parametrů pro rotační pneumatické pístové motory	13
1.1 Pneumatické rotační motory	13
1.2 Výhody a nevýhody rotačních pneumatických motorů	13
1.3 Pístové pneumatické motory	14
1.4 Zubové pneumatické motory	15
1.5 Lamelové pneumatické motory	16
1.6 Výpočtové parametry pro rotační pneumatické motory	18
2 Přehled snímačů veličin a parametrů pro měření na pneumomotoru všeobecně a pro parametry zadaného pneumomotoru	27
2.1 Měření tlaku a tlakové difference	27
2.2 Měření průtoků (spotřeba stlačeného vzduchu).....	29
2.3 Měření teploty.....	30
2.4 Měření otáček	31
2.5 Měření krouticího momentu a výkonu	32
2.6 Vyhodnocení veličin.....	34
3 Přehled možných brzdících systémů a konkrétně pro parametry.....	36
3.1 Třecí kotoučové brzdy	36
3.2 Brzdění stejnosměrným derivačním motorem.....	38
3.3 Brzdění asynchronním motorem	40
4 Metodika měření statických charakteristik pneumomotoru: momentu výkonu spotřeby a měrné spotřeby na otáčkách motoru	43
4.1 Metodika měření statické charakteristiky pneumomotoru momentu v závislosti na otáčkách.....	45
4.2 Metodika měření statické charakteristiky pneumomotoru výkonu v závislosti na otáčkách.....	45
4.3 Metodika měření statické charakteristiky pneumomotoru spotřeby vzduchu v závislosti na otáčkách.....	46
4.4 Metodika měření statické charakteristiky pneumomotoru měrné spotřeby vzduchu v závislosti na otáčkách.....	47
5 Projekt zkušebního zařízení pro dané parametry a velikost motoru	49
5.1 Experimentální měření	52
Závěr.....	58
Zdroje	59

Seznam použitých veličin

Symbol	Význam	Jednotky
A_1	Polytropická absolutní práce	J
A_2	Izobarická absolutní práce	J
A_e	Skutečná práce	J
A_i	Indikovaná práce	J
A_t	Teoretická práce	J
F	Síla	N
I	Proud	A
K	Ovládací síla soustavy	N
L	Zdvih pístu	mm
M	Krouticí moment	Nm
M_B	Brzdňý moment	Nm
M_k	Krouticí moment	Nm
M_{max}	Maximální moment	Nm
M_M	Skutečný moment	Nm
M_S	Moment odporu pracovního mechanismu	Nm
M_t	Teoretický moment	Nm
M_z	Záběrový moment	Nm
P	Výkon	W, kW
P_e	Efektivní výkon	W, kW
P_{max}	Maximální výkon	W, kW
$P_{měř}$	Změřený výkon	W, kW
P_t	Teoretický výkon	W, kW
P_t'	Teoretický výkon motoru při uvažování mechanických ztrát	W, kW
P_{vyp}	Vypočítaný výkon	W, kW

P_z	Ztrátový výkon	W, Kw
Q	Průtok	$\text{l} \cdot \text{min}^{-1}, \text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
Q_{max}	Maximální průtok	$\text{l} \cdot \text{min}^{-1}, \text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
Q_{MN}	Normální průtok	$\text{l}_N \cdot \text{min}^{-1}, \text{m}_N^3 \cdot \text{min}^{-1}$
Q_t	Teoretický průtok	$\text{l} \cdot \text{min}^{-1}, \text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
R_1, R_2, R_3	Elektrický odpor	Ω
R_H	Odpor kotvy	Ω
R_w	Budící odpor	Ω
S	Obsah	mm^2
S_D	Plocha brzdových destiček	m^2
S_k	Plocha pístu kolového válce	m^2
T_1, T_2	Třecí síla	N
U	Napětí	V
V	Objem	m^3
V_I	Objem	m^3
V_c	Celkový objem	m^3
V_g	Geometrický objem	$\text{m} \text{ m}^3$
V_{gN}	Normální geometrický objem	m_N^3
c^*	Brzdny součinitel	-
$\cos\varphi$	Účinník	-
d	Průměr	m
i	Počet pístů	-
\bar{m}	Měrná spotřeba	$\text{N} \cdot \text{m}^3/\text{t}$
n	Otáčky	min^{-1}
n_e	Polytropický exponent	-
n_M	Otáčky motoru	min^{-1}
n_{max}	Maximální otáčky	min^{-1}
n_{ust}	Ustálené otáčky	min^{-1}

p	Tlak	Pa, bar, MPa,
p_0	Atmosférický tlak	Pa, bar, MPa,
p_1	Tlak ve vzdušníku	Pa, bar, MPa,
p_2	Tlak na vstupu do pneumo- motoru	Pa, bar, MPa,
p_i	Indikovaný tlak	Pa, bar, MPa,
p_{it}	Indikovaný tlak	Pa, bar, MPa,
r	Poloměr	mm
r_B	Poloměr kotouče	mm
H	zdvih	mm
η_c	Celková účinnost	-
η_i	Indikovaná účinnost	-
η_k	Účinnost kolového válce	-
η_m	Mechanická účinnost	-
η_Q	Průtoková účinnost	-
Δp	Tlakový spád	Pa, bar, MPa,
δ	Poměrné plnění	-
π	Ludolfovo číslo	-
τ	Čas	min
ω	Úhlové zrychlení	rad.s ⁻²

Seznam použitých značek

Symbol	Význam
<i>A</i>	Ampérmetr
<i>ASM</i>	Asynchronní motor
<i>B</i>	Brzda
<i>C</i>	Kondenzátor
<i>M5050</i>	vyhodnocovací zařízení
<i>PC</i>	Počítač
<i>PM</i>	Pneumatický motor
<i>R_d</i>	Poloměr
<i>R</i>	Reostat
<i>RV</i>	Redukční ventil
<i>RZ</i>	Rozvaděč
<i>S₁</i>	Snímač tlaku
<i>S₂</i>	Snímač otáček
<i>S₃</i>	Snímač momentu
<i>S₄</i>	Snímač průtoku
<i>SM</i>	Stejnoseměrný motor
<i>ŠV</i>	Škrticí ventil
<i>V</i>	Voltmetr
<i>VZ</i>	Vzdušník
<i>W</i>	Měřič výkonu

ÚVOD

Výrobou pneumatických rotačních pneumomotorů se zabývá celá řada světových společností, jako jsou SMC, Festo, Parker atd. Tyto motory se používají v mnoha odvětvích strojírenského průmyslu. Pro jejich užití v různých systémech je třeba znát jejich jednotlivé parametry.

Ke zjištění parametrů se využívají zařízení vybavená moderními snímači, kdy tyto umožňují snímání různých veličin. Cílem diplomové práce je navrhnout projekt zkušebního zařízení pro zadaný pneumomotor, které umožňuje získání charakteristik při zátěži pneumomotoru.

1 Přehled základních výpočtových parametrů pro rotační pneumatické pístové motory

1.1 Pneumatické rotační motory

Pneumatické rotační motory vykonávají rotační pohyb nebo pohyb vratný pomocí tlakové energie vzduchu a pracovního prvku. Pracovním prvkem je konkrétně píst, bok zubu nebo lamela.

Mezi pneumatické rotační motory patří motory pístové, zubové a lamelové. Každý z uvedených motorů patří do skupiny objemových. Jelikož pneumatické pohony mají velmi malou celkovou energetickou účinnost ve srovnání s elektrickými a hydraulickými pohony, používají se tyto motory velmi zřídka jako hnací stroje. Pro srovnání účinností jednotlivých pohonů viz Tab. 1 [1].

Tab. 1 Celkové energetické účinnosti pohonů [1]:

Druhy pohonů	Celková účinnost pohonu η
Elektrické pohony	0,85 až 0,92
Hydraulické pohony	0,7 až 0,74
Pneumatické pohony	0,1 až 0,15

1.2 Výhody a nevýhody rotačních pneumatických motorů

Navzdory nízké celkové bilanci pneumatických rotačních motorů, mají tyto motory i jiné výhody, které mohou konkurovat elektrickým či hydraulickým motorům. K těmto výhodám patří:

- jednoduchá konstrukce pneumatických motorů;
- nízké nároky na jakost obrábění a materiál;
- jednoduchá obsluha a spolehlivost v oboru;
- možnost provozu i v extrémních podmínkách (v prašném, výbušném, vlhkém, korozivním prostředí atd.);
- možnost automatizace;
- snadná montáž a údržba;
- možnost dlouhodobého přetížení motorů bez fatálních následků;
- čistota provozu;

- v uzavřených prostorech umožňuje zpříjemňování ovzduší např. v hlubinných dolech;
- možnost akumulace energie, tlumení rázů a kmitání v systému;
- přizpůsobivost provozu mechanismů, u kterých dochází k častým reverzacím, značným změnám zatížení, ke kmitání a vibracím;
- rychlost provozu převyšuje několika násobně elektrické či hydraulické pohony. [1]

K hlavním nevýhodám pneumatických rotačních motorů patří:

- nízká celková účinnost (již bylo uvedeno);
- nákladná výroba stlačeného vzduchu;
- nutná úprava stlačeného vzduchu (vzduch musí být zbaven vlhkosti, mechanických nečistot a musí být nasycen olejovou mlhou);
- hlučnost (v mnohých případech musí být tlumen tlumiči);
- obtížná regulace otáček na přené hodnoty a jejich udržení při konstantních hodnotách. [1]

1.3 Pístové pneumatické motory

V radiálně umístěných válcích kolem osy motoru jsou umístěny písty konající vratný pohyb. Tento pohyb umožňuje klikový mechanismus nebo mechanismus s excentrem, které následně umožňují dosažení vysokého záběrového momentu.

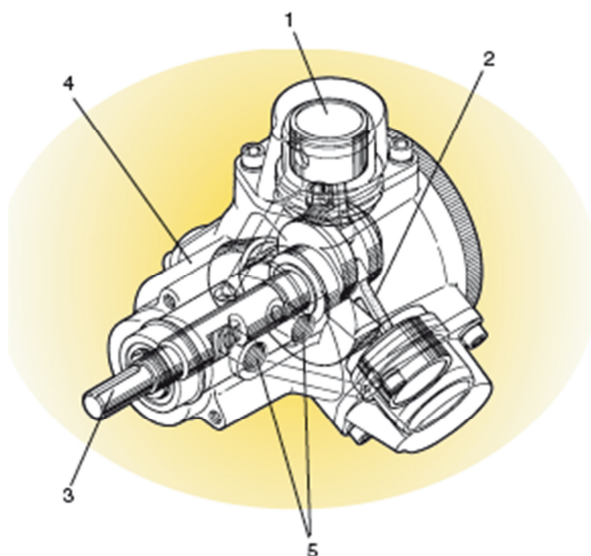
Rozsah výkonů radiálních pístových motorů se vyrábí od 0,5 do 50 kW. Nejvíce rozšířené radiální pístové motory se vyrábějí od 2 do 15 kW.

Otáčky motoru je pohybují od 360 do 1500 min⁻¹, pracovní tlak mezi 0,4 a 0,6 MPa.

Výhoda těchto pneumatických motorů spočívá v minimálních objemových ztrátách díky přesnému umístění pístů ve válcích. Spotřeba vzduchu v pístových pneumatických motorech činí 45 až 65 m_N³ · kW⁻¹ · h⁻¹. U zubových pneumatických motorů je spotřeba vzduchu vyšší téměř o 10%. Konstrukční provedení pneumatických pístových motorů je složitější z důvodu přesného řízení průtoku.

K řízení průtoku se nejčastěji používá rotační válcové šoupátko, kdy jeho pohyb je odvozen od pohybu hřídele motoru.

Pístové pneumatické motory vyrábí celá řada společností s různými technickými parametry. Jedná se např. o společnost Parker v malém rozsahu výkonů od 0,07 do 0,23 kW, otáček do 1100 min^{-1} při pracovním tlaku 0,5 MPa v sériové výrobě. Dále společnost Taiyo vyrábí tyto motory v rozsahu výkonu od 0,2 do 15 kW, otáček od 50 do 1500 min^{-1} při pracovním tlaku 0,6 MPa. Příklad konstrukce pístového pneumomotoru viz Obr. 1[1].



Obr. 1 Schéma radiálního pístového pneumomotoru [15]

(1. píst, 2. ojnice, 3. hřídel, 4. kryt motoru, 5. připojovací hrdla)

1.4 Zubové pneumatické motory

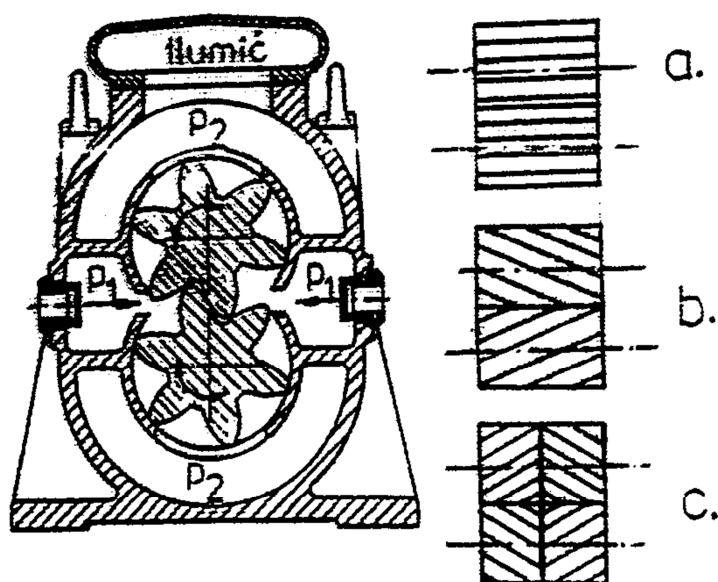
Konstrukční provedení zubových pneumatických motorů je jednodušší než u pístových motorů a je i menších rozměrů. Skládají se ze dvou ozubených rotorů uložených ve skříni motoru. Zubové motory pracují hlučněji než pístové motory a mají také větší spotřebu vzduchu, protože mezi ozubenými rotory a skříní motoru jsou nepatrné čelní a obvodové vůle. Ozubené rotory se vyrábí v tomto provedení se zuby přínými, šikmými nebo šípovými.

U motorů s přínými nebo šikmými zuby lze provést reverzace otáčení, protože pracují jako plnotlaké motory. Motory se šípovými zuby pracují s částečným plněním a reverzace otáček lze provést pouze ozubeným převodem.

Zubové motory se vyrábí pro výkony 5 až 15 kW s přínými zuby, se šikmými zuby pro výkony 15 až 60 kW. Rozsah otáček činí 1500 nebo 3000 min^{-1} .

V ČR vyrábí pneumatické zubové pneumomotory akciová společnost OSTROJ Opava v celkem sedmi typech pro výkony 3 až 40 kW a otáček 2900 min^{-1} . Spotřeba vzduchu se dle výkonu pneumomotoru pohybuje v rozmezí $300 \text{ až } 2000 \text{ m}_N^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

V zahraničí vyrábí zubové pneumomotory několik společností, z nichž nejznámější je Düsterloh, SRN, tyto vyrábějí pneumomotory až do výkonu 66 kW v různých variantách. Speciální konstrukce zubového pneumomotoru této společnosti je provedena jako pneumatický startér pro výkon 4,7 až 44 kW a krouticí moment 30 až 330 Nm, který se užívá pro startování spalovacích motorů o velkých výkonech. Příklad konstrukce zubového pneumomotoru viz Obr. 2[1].



Obr. 2 Schéma zubového pneumomotoru [8]

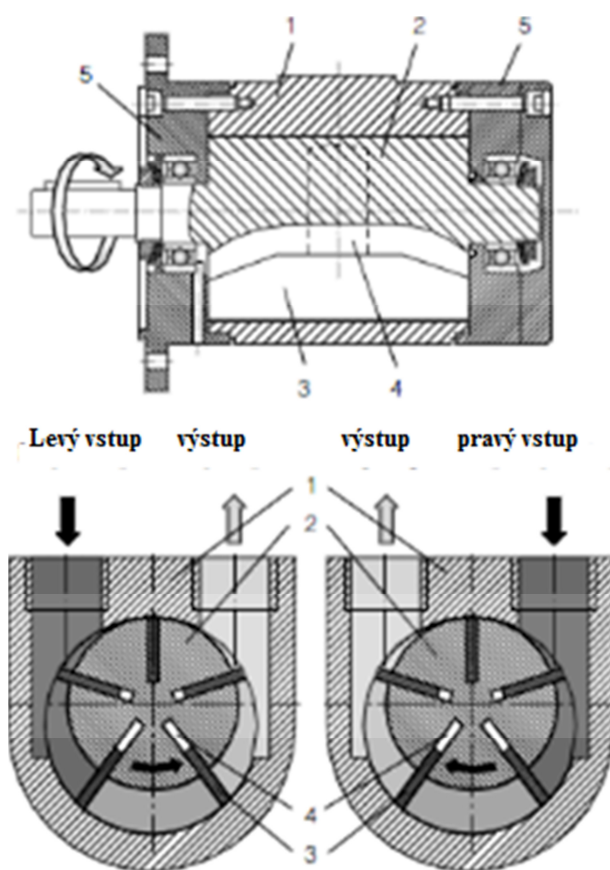
1.5 Lamelové pneumatické motory

Nejrozšířenější z pneumatických rotačních motorů jsou motory lamelové. Používají se zejména jako pohony pro ruční nářadí (např. vrtačky, brusky, utahováky). Jsou často vestavovány přímo do tělesa strojů pro svoji nízkou hmotnost a jednoduchost konstrukce. Lamelové pneumatické motory mohou pracovat v jednom směru otáčení jako nereverzační, ale i v obou směrech otáčení při změně přívodu stlačeného vzduchu jako reverzační. Výhodou lamelových pneumatických motorů je snadné připojení na průmyslový rozvod stlačeného vzduchu ve výrobních halách nebo jeho připojení na jiný mobilní zdroj stlačeného vzduchu

(např. kompresor). Z tohoto důvodu je možné využít lamelový pneumomotor v nejrůznějších odvětvích výroby a montáže.

Nejpoužívanějšími pneumaticky poháněnými nástroji v praxi jsou brusky, vrtačky, utahováky atd.

Rozsah výkonů u vyráběných lamelových pneumomotorů se pohybuje od několika desítek W do 5 kW, v některých případech i 20 kW. Rozsah otáček u lamelových pneumomotorů činí od několika set otáček za minutu až po několik desítek tisíc otáček za minutu. Redukci vysokých otáček lze zajistit pomocí jedno nebo dvoustupňového převodu. Příklad konstrukce lamelového pneumomotoru viz Obr. 3[1].



Obr. 3 Schéma lamelového pneumomotoru

(1. stator, 2. rotor, 3. lamely, 4. pružina, 5. koncová část s ložiskem) [15]

Tab. 2 Parametry rotačních pneumatických motorů [1]

Typ motoru	Otáčky [min^{-1}]	Výkon [kW]	Spotřeba [$\text{m}_N^3 \cdot \text{min}^{-1}$]
Zubový s přímými zuby	1450-3000	5÷15	8÷35
Zubový s šikmými zuby	1450-3000	15÷60	8÷35
Pístový radiální	350-1500	2÷15	6÷23
Lamelový	2000-70000	5÷20	0,3÷2,5

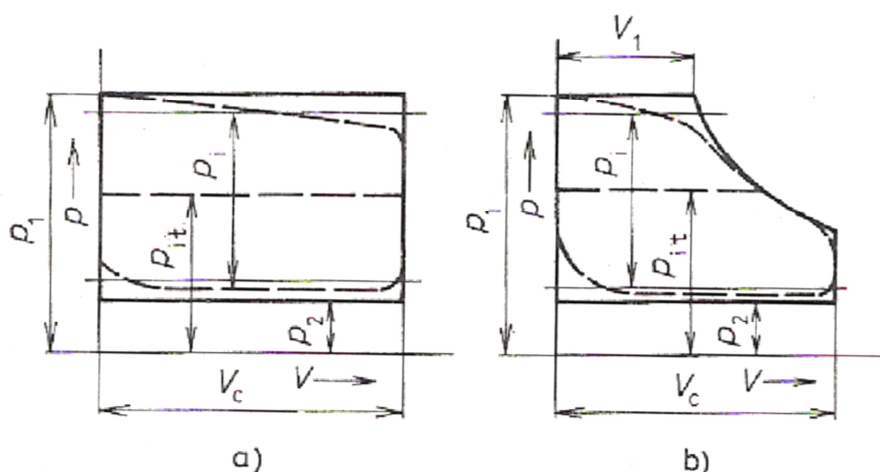
Při návrhu zkušebního zařízení rotačních pneumatických motorů se bude práce dále zabývat radiálním pístovým pneumatickým motorem dle zadání diplomové práce viz Tab. 3.

Tab. 3 Zadání pneumomotoru

Typ motoru	Max. otáčky [min^{-1}]	Max. výkon [kW]	Max. moment [N.m]
Pístový radiální	1000	0,2	2

1.6 Výpočtové parametry pro rotační pneumatické motory

Indikátorový diagram viz Obr. 4, který zobrazuje pracovní cyklus pneumatického motoru jako závislost tlaku p na objemu V . V pracovním prostoru působí tlak vzduchu, který je parametrem pneumatického motoru. Poměrem objemu stlačeného vzduchu V_1 a celkového objemu pracovního prostoru V_c se určuje poměrné plnění δ u motoru s částečnou expanzí. U těchto motorů volíme rozsah poměrného plnění od 0,45 do 0,7. U moderních motorů se poměrné plnění volí 0,5. Pro plnotlaké motory se poměrné plnění volí 1 [1,2].



Obr. 4 Indikátorový diagram pneumatického motoru [2]

(a - plnotlaký motor, b – motor s částečnou expanzí)

1.6.1 Účinnost pneumatického motoru

Mechanická účinnost η_m - je poměr skutečné práce A_e a indikované práce A_i .

$$\eta_m = \frac{A_e}{A_i} \quad (1.1)$$

Indikovaná účinnost η_i – je poměr indikované práce A_i a teoretické práce.

$$\eta_i = \frac{A_i}{A_t} \quad (1.2)$$

Celková účinnost η_c

$$\eta_c = \eta_m \cdot \eta_i = \frac{A_e}{A_i} \cdot \frac{A_i}{A_t} = \frac{A_e}{A_t} \quad (1.3)$$

Rozsah mechanických účinností:

- pro pneumatické pístové motory $\eta_m = 0,85$ až $0,9$;
- pro pneumatické zubové motory $\eta_m = 0,90$ až $0,95$;
- pro pneumatické lamelové motory $\eta_m = 0,80$ až $0,9$.

Z důvodu závislosti indikované účinnosti pneumatických motorů na otáčkách, jsou hodnoty této účinnosti uvedeny jednotlivého typu motoru. Zahrnutí indikované účinnosti do výpočtu by mělo smysl pouze v případě znalosti indikovaných diagramů [2].

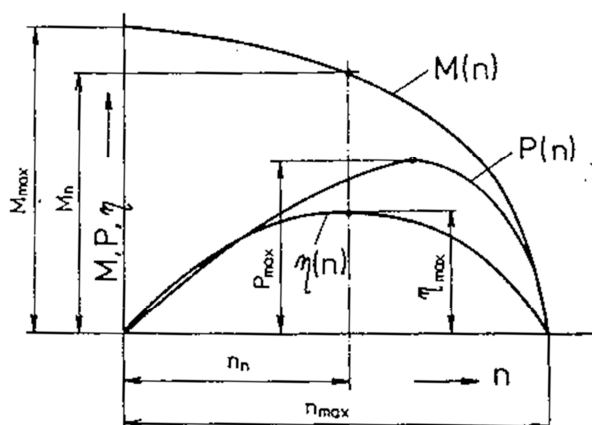
1.6.2 Momentová charakteristika motoru - $M(n)$

Teoretický moment M_t

$$M_t = \frac{p_i \cdot V_g}{2\pi} \quad (1.4)$$

Skutečný moment motoru M_s

$$M_s = M_t \cdot \eta_m \quad (1.5)$$



Obr. 5 Momentová charakteristika pneumatického motoru [1]

1.6.3 Výkonová charakteristika motoru - $P(n)$

Teoretický výkon motoru P_t

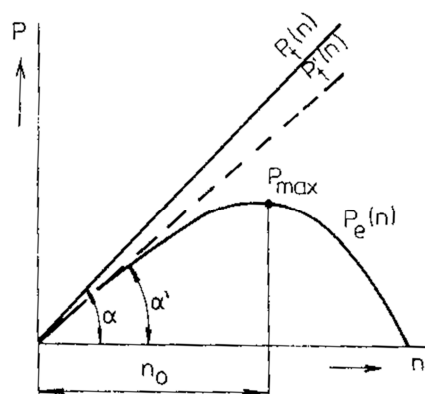
$$P_t = V_g \cdot n_M \cdot p_{it} \quad (1.6)$$

Teoretický výkon motoru při uvažování mechanických ztrát P'_t

$$P'_t = P_t - P_z = V_g \cdot n_M \cdot p_{it} \cdot \eta_m \quad (1.7)$$

Efektivní výkon P_e

$$P_e = V_g \cdot n_M \cdot p_{it} \cdot \eta_m \cdot \eta_i \quad (1.8)$$

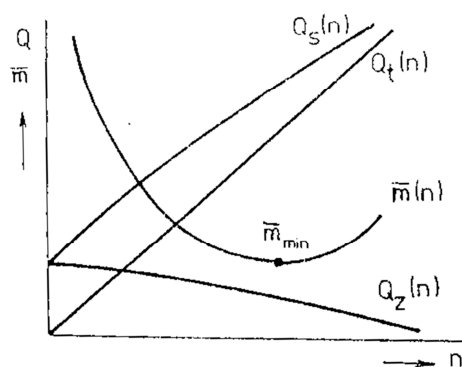


Obr. 6 Výkonová charakteristika pneumatického motoru [1]

1.6.4 Průtoková charakteristika motoru - $Q(n)$

Teoretická spotřeba vzduchu pneumatického motoru

$$Q_t = V_g \cdot n_M \cdot \delta \quad (1.19)$$



Obr. 7 Průtoková charakteristika pneumatického motoru [1]

1.6.5 Základní výpočty pneumatického pístového motoru

Jako základ výpočtů je uvažováno krouticího momentu, výkonu a spotřeby vzduchu. Pro určení těchto výpočtů musíme nejdříve stanovit geometrický objem pracovního prostoru motoru, který se uskuteční za jednu otáčku hřídele [2].

Geometrický objem za otáčku V_g

$$V_g = i \cdot S \cdot L \quad (1.10)$$

Efektivní výkon motoru P_e

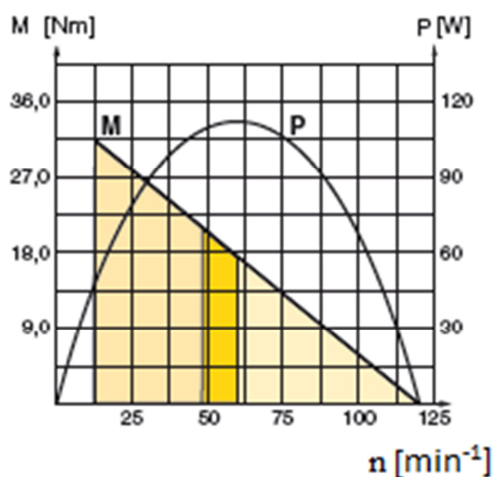
$$P_e = V_g \cdot n_M \cdot p_{it} \cdot \eta_m = i \cdot S \cdot L \cdot n_M \cdot p_{it} \cdot \eta_m \quad (1.11)$$

Krouticí moment M_M

$$M_M = \frac{i \cdot S \cdot L \cdot p_{it}}{2\pi} \cdot \eta_m \quad (1.12)$$

Spotřeba vzduchu Q

$$Q = \frac{p_2}{p_0} \cdot i \cdot S \cdot L \cdot n_M \cdot \delta \cdot \eta_Q \quad (1.13)$$



Obr. 8 Teoretická charakteristika radiálního pístového motoru[15]

Tato charakteristika je uvedena pro radiální pístový motor, který má téměř shodné vlastnosti parametry se zadáním diplomové práce.

1.6.6 Příklad výpočtu základních parametrů pístového pneumomotoru

Příklad výpočtu je uveden pro pístový pneumatický motor s parametry, které jsou zadáním diplomové práce. Jedná se o motor o výkonu 0,2 kW, max. otáčky 1000 min^{-1} , max. moment 2 Nm. Předpokládaný absolutní tlak ve vzdušníku je $p_1 = 0,7 \text{ MPa}$ a absolutní tlak na vstupu do motoru je $p_2 = 0,6 \text{ MPa}$. Atmosférický tlak byl zvolen $p_0 = 0,1 \text{ MPa}$ a poměrné plnění motoru $\delta = 0,5$. S uvažováním průtokových byla zvolena průtoková účinnost $\eta_Q = 0,9$ a mechanická účinnost $\eta_m = 0,85$.

Střední indikovaný tlak p_{it}

$$p_{it} = \delta \cdot p_2 \cdot \frac{n_e - \delta^{n_e-1}}{n_e - 1} - p_0 = 0,5 \cdot 600000 \cdot \frac{1,32 - 0,5^{1,32-1}}{1,32 - 1} - 100000 = 386497 \text{ Pa}$$

Geometrický objem motoru za otáčku V_g

$$M_M = \frac{V_g \cdot \Delta p}{2\pi} \Rightarrow V_g = \frac{2\pi \cdot M_M}{\Delta p} = \frac{2\pi \cdot 2}{500000} = 2,51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$\Delta p = p_2 - p_1 = 600000 - 100000 = 500000 \text{ Pa}$$

Po zahrnutí poměrného plnění $\delta = 0,5$ budu geometrický objem dvojnásobný

$$V_g = 5,02 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3.$$

Efektivní výkon motoru P_e

$$P_e = V_g \cdot n_M \cdot p_{it} \cdot \eta_m = 2,51 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{1000}{60} \cdot 386497 \cdot 0,85 = 137 \text{ W} = 0,137 \text{ kW}$$

Krouticí moment motoru M_M

$$M_M = \frac{V_g \cdot p_{it}}{2\pi} \cdot \eta_m = \frac{2,51 \cdot 10^{-5} \cdot 386497}{2\pi} \cdot 0,85 = 1,31 \text{ N} \cdot \text{m}$$

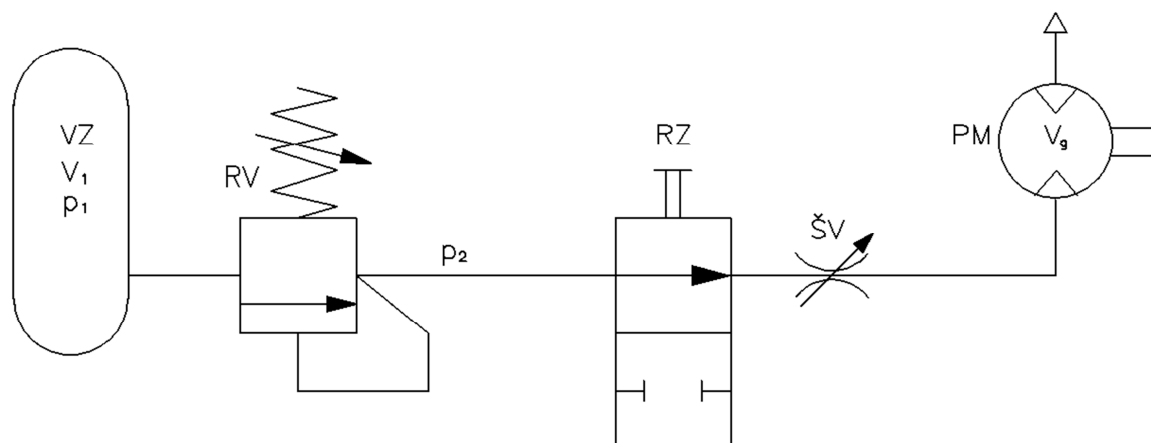
Normální spotřeba vzduchu motoru

$$Q_N = \frac{p_2}{p_0} \cdot V_g \cdot n_M \cdot \delta \cdot \eta_Q = \frac{600000}{100000} \cdot 2,51 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{1000}{60} \cdot 0,5 \cdot 0,9 = 1,13 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$= 1,13 \text{ dm}_N^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

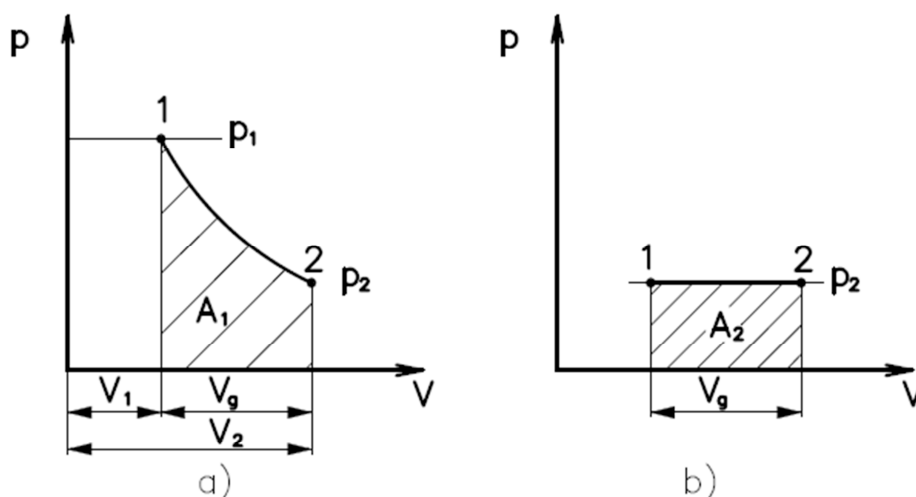
1.6.7 Výpočet velikosti vzdušníku

Velikost vzdušníku je počítána pro pokrytí spotřeby vzduchu pro zadané parametry motoru. Motor pracuje při konstantním absolutním tlaku 0,6 bar, proto je v pneumatickém obvodu umístěn redukční ventil, který zajišťuje konstantní tlak na vstupu do motoru.



Obr. 9 Schéma zapojení vzdušníku do pneumatického obvodu

VZ	vzdušník
RV	redukční ventil
RZ	rozvaděč
ŠV	škrticí ventil
PM	pneumatický motor
V_1	objem vzdušníku
V_g	geometrický objem pneumatického
p_1	tlak ve vzdušníku
p_2	tlak za pojistným ventilem



Obr. 10 a) polytropická absolutní práce A_1 b) izobarická absolutní práce A_2

Průtok pístovým pneumatickým motorem při absolutním tlaku 0,6 MPa.

$$Q_M = V_g \cdot n_M \cdot \frac{1}{\eta_Q} = 5,02 \cdot 10^{-5} \cdot 1000 \cdot \frac{1}{0,9} = 0,055 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$$

Normální průtok pístovým pneumatickým motorem při absolutním tlaku 0,6 MPa.

$$Q_{MN} = \frac{p_2}{p_0} \cdot Q_M = \frac{600000}{100000} \cdot 0,055 = 0,33 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$$

Normální geometrický objem, který proteče pístovým pneumatickým motorem za 1 minutu.

$$V_{gN} = Q_{MN} \cdot \tau = 0,33 \cdot 1 = 0,33 \text{ m}^3$$

Geometrický objem, který proteče pístovým pneumatickým motorem za 1 minutu.

$$V_g = Q_M \cdot \tau = 0,055 \cdot 1 = 0,055 \text{ m}^3$$

Polytropická absolutní práce pro změnu ve vzdušníku až po redukční ventil.

$$A_1 = \frac{p_1 \cdot V_1}{n_e - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n_e - 1}{1}} \right] \quad (1.15)$$

Izobarická absolutní práce pro změnu při $p_2 = konst.$ za redukčním ventilem.

$$A_2 = p_2 \cdot V_g = 6 \cdot 10^5 \cdot 0,055 = 3,3 \cdot 10^4 \text{ J}$$

$$A_2 = A_1 = 3,3 \cdot 10^4 \text{ J}$$

Z rovnosti $A_1 = A_2$ plyne vztah pro velikost vzdušníku.

$$V_1 = V_V = \frac{A_1 \cdot (n_e - 1)}{p_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n_e - 1}{n_e}} \right]} = \frac{3,3 \cdot 10^4 \cdot (1,32 - 1)}{7 \cdot 10^5 \cdot \left[1 - \left(\frac{6 \cdot 10^5}{7 \cdot 10^5} \right)^{\frac{1,32 - 1}{1,32}} \right]} = 0,405 \text{ m}^3$$

Z výše uvedeného výpočtu je patrné, že daný pneumatický motor může pracovat přibližně 1 minutu při velikosti vzdušníku $V_1 = 0,405 \text{ m}^3$. V pneumatické laboratoři byla provedena zkouška vyprazdňování vzdušníku o objemu $0,474 \text{ m}^3$. Při měření byl vzdušník natlakován na absolutní tlak, který činil $0,7 \text{ MPa}$. Následně byl nastaven na snímači průtoku Ifm Electronic SD6000 průtok na $Q_{MN} = 0,33 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Po spuštění zkoušky byl sledován pokles tlaku ve vzdušníku pomocí zařízení Hydrotechnik M5050 a snímače tlaku PR15 Hydrotechnik. Pokles na absolutní tlak ve vzdušníku $0,6 \text{ MPa}$ proběhl přibližně za 65 sekund. Z toho vyplývá, že doba zkoušení pístového pneumatického motoru Parker P1V-P012A01800 by neměla přesáhnout jednu minutu při konstantním tlaku $0,6 \text{ MPa}$. Pro delší měření je nutné použít vzdušník větších rozměrů.

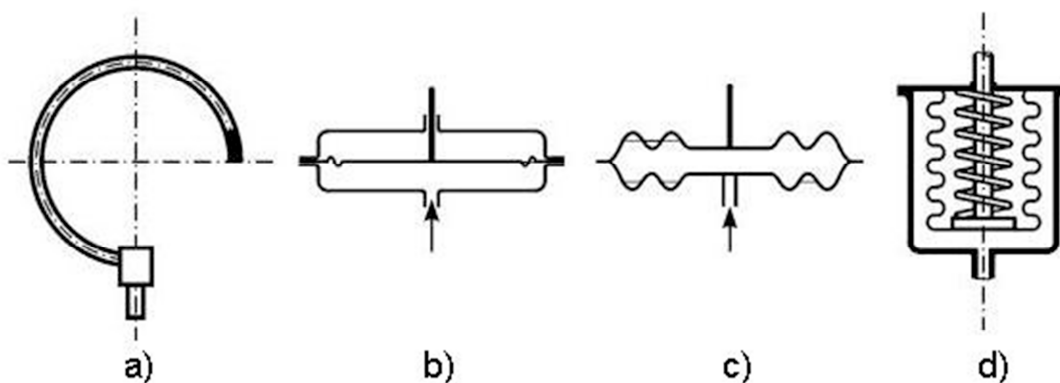
2 Přehled snímačů veličin a parametrů pro měření na pneumomotoru všeobecně a pro parametry zadaného pneumomotoru

Pro měření fyzikálních veličin na pneumatických rotačních motorech je možno vyhledat celou řadu snímačů a měřicích zařízení. Dle zadání a realizace měření se dále zaměřím pouze na snímače a měřicí zařízení, které jsou k dispozici v pneumatické laboratoři.

2.1 Měření tlaku a tlakové difference

Měření tlaku, tlakového spádu a podtlaku je jedním z nejdůležitějších požadavků ve všech pneumatických systémech. Firmy zabývající se měřením tlaku, tlakového spádu a podtlaku nabízejí široký sortiment tlakoměrů.[3]

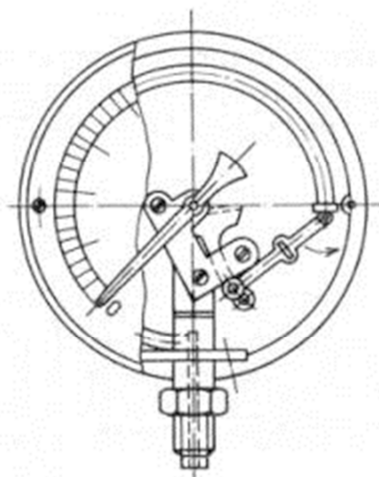
V nejčastějším případě používáme deformační tlakoměry. Jejich funkce spočívá na pružné deformaci členů namáhané měřeným tlakem. Tlakové namáhání však musí být v rozsahu pružných deformací. Jako deformační členy jsou nejvíce rozšířené Bourdonova trubice, membrána, krabice a vlnovec viz Obr. 11.[3]



Obr. 11 Základní tvary deformačních prvků[3]

a) Bourdonova trubice, b) membrána, c) krabice, d) vlnovec

Tlakoměry s Bordovou trubicí pracují na principu trubice oválného průřezu, která je na jednom konci stočená do kruhového oblouku. Trubice je pevně spojena tělesem tlakoměru. Jedním otevřeným koncem trubice je přiveden měřený tlak. Tento konec je opatřen závitem, který zajišťuje připevnění k danému měřenému ústrojí. Druhý konec trubice je spojen se stupnicí s ručičkou pomocí převodového ústrojí. Posunutí volného konce je úměrné měřenému tlaku. Měřicí rozsah tlakoměrů s Bordovou trubicí je od 0 do 200 MPa. Za pomoci těchto tlakoměrů lze měřit i podtlak. Odporové tenzometry umístěné na stěně trubky převádějí tlak na elektrický signál. Tlakoměr s Bordovou trubicí viz Obr.12.[3]



Obr. 12 Tlakoměr s Bordovou trubicí[3]

PR 15 Hydrotechnik je senzor pro měření tlaku či tlakové difference pro mobilní a stacionární využití viz Obr. 13. Pracuje na piezoelektrickém principu. Využívá piezoelektrického jevu, který se projevuje mechanickými deformacemi u některých druhů krystalů, kde dochází ke vzniku elektrického náboje. Tento snímač tlaku je vybaven výstupním analogovým signálem 4 až 20 mA, který lze snadno propojit s vyhodnocovacím zařízením Hydrotechnik (5000 a 5050) viz Obr. 22. Připojení snímače do obvodu se provádí pomocí Minimez přípojek, ale pouze do potrubí. Při použití pneumatických hadic se používá nástrčné šroubení. Pro měření v pneumatice tento snímač pracuje v rozsahu od -0,1 MPa do 0,6 MPa. Přesnost měření pro snímač je $\pm 0,25\%$. [18]



Obr. 13 Snímač tlaku PR 15 Hydrotechnik[18]

Snímač SMC řady ISE40A viz Obr. 14 je vhodný pro snímání tlaku pro zkušební zařízení na výstupu z kompresoru. Pracuje na piezoelektrickém principu. Využívá piezoelektrického jevu, který se projevuje mechanickými deformacemi u některých druhů krystalů, kde dochází

ke vzniku elektrického náboje. Je vybaven barevným displejem s možností zobrazení maximální i minimální hodnoty tlaku. Do obvodu lze připojit pomocí nástrčných spojek nebo závitu. Umožňuje snímání tlaku v rozsahu od -0,1 do 1 MPa s přesností 0,2% z celkového rozsahu. Při použití musí být připojen ke zdroji 12 – 24 V.[24]



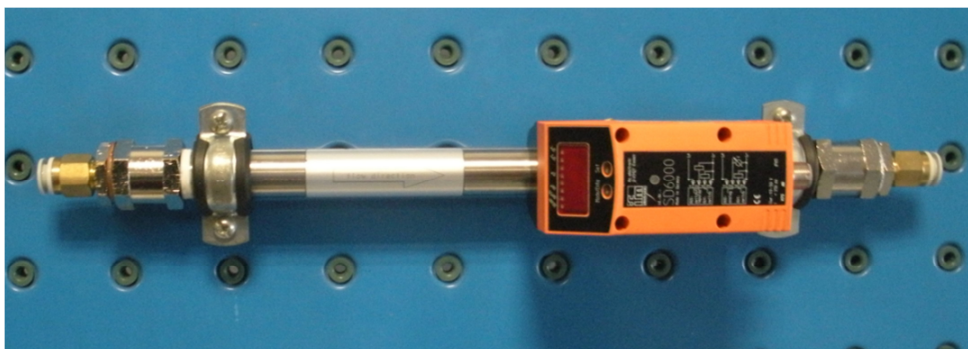
Obr. 14 Snímač tlaku SMC řady ISE40A[24]

2.2 Měření průtoků (spotřeba stlačeného vzduchu)

Průtok je druhá hlavní veličina, která se měří v pneumatice, Zjištěný průtok se dále používá k různým výpočtům pneumatického systému. Nejčastějším označením průtoku je Q , jednotky se uvádí v $m^3 \cdot s^{-1}$ nebo v $dm^3 \cdot min^{-1}$. Tento průtok se odvádí zpět do atmosféry, proto se také nazývá jako spotřeba vzduchu. Pro měření průtoků stlačeného vzduchu existuje rozmanité množství snímačů od různých firem [1].

Pro měření průtoků je možné využít turbínový průtokoměr opatřeným analogovým vyhodnocovacím zařízením a analogovým výstupem 0 až 20 mA. Tryska přivádí měřený průtok k měřicímu prvku, kterým je lopátkové kolo. Výměnou trysky měníme rozsah maximálního měřeného průtoků. Turbínový průtokoměr měří s přesností 2,5% z celého rozsahu [1].

V současnosti se používají moderní snímače průtoků jako např. snímač firmy Ifm Electronic SD6000 viz Obr. 15, který pracuje na kalorimetrickém principu. Žhavené těleso předává tepelný výkon měřenému médiu (v našem případě vzduchu), čímž ho zahřívá. Teploměry snímají teplotu okolního média. Rychlost průtoků se pak vyhodnocuje na základě elektrického příkonu a teplot. Tento snímač je také vybaven analogovým výstupem 4 až 20 mA, kterým lze zaznamenávat údaje pomocí elektronické karty do PC. Rozsah měření spotřeby stlačeného vzduchu je 0 - 1250 v $dm^3 \cdot min^{-1}$ s přesností $\pm 0,2\%$. Do pneumatického obvodu lze připojit pomocí nástrčného šroubení.



Obr. 15 Snímač průtoku Ifm Elektronik SD6000

2.3 Měření teploty

Teplota je jedna ze stavových veličin stlačeného vzduchu. Nedá se měřit přímo, proto ji měříme tak, že sledujeme změny různých vlastností látek způsobené změnami teploty. Při zkoušení pneumatických prvků je měření teploty velmi důležité a často ji měříme na více místech současně.[1]

Teplotu můžeme měřit rtuťovými teploměry, tyto měří s vysokou přesností na desetiny °C. Jejich nevýhodou je křehkost, proto se při zkoušení pneumatických nepoužívají.[3]

Dvojkové teploměry (bimetalické) pracují na dilatačním principu. Skládají se ze dvou kovových pásků s rozdílným součinitelem roztažnosti. Vlivem měřené teploty se kovové pásky zdeformují a téměř okamžitě umožňují vizuální kontrolu teploty. Jejich teplotní rozsah je od -30 do 110 °C. Výhodou těchto teploměrů je možnost vestavění přímo do systému. Měří s přesností ± 1 °C.[3]



Obr. 16 Dvojkový teploměr

Mezi nejrozšířenější teploměry patří odporové teploměry. Měří teplotu v závislosti odporu materiálu na teplotě. Vyrábí se odporová čidla kovová (platina, nikl, měď) nebo polovodičová monokrystalická (křemíkové a termistory). Jejich výhodou je značný rozsah měřicí teploty od -200 do 800 °C.[3]

Snímač teploty Pt100 viz Obr. 17 Hydrotechnik pracuje na piezoelektrickém principu. Využívá piezoelektrického jevu, který se projevuje mechanickými deformacemi u některých druhů krystalů, kde dochází ke vzniku elektrického náboje. Snímač se zapojuje do obvodu nejčastěji pomocí jímky a má analogový výstup 4 až 20 mA. Tento snímač se dále připojuje k vyhodnocovacímu zařízení Hydrotechnik (5000 a 5050). Rozsah měření činí od -50°C do 200°C s přesností $\pm 1\%$ z celého rozsahu.[18]



Obr. 17 Snímač teploty Pt100 Hydrotechnik[18]

2.4 Měření otáček

Nejjednodušší snímání otáček umožňuje elektrický otáčkoměr s číslicovým výstupem. Měří otáčky s přesností $\pm 1 \text{ min}^{-1}$ a jeho rozsah činní od 0 do 9999 min^{-1} . Při měření otáček se hrot otáčkoměru umístí do středícího důlku hřídele nebo na povrch rotujícího hřídele.[1]

Elektrodynamické otáčkoměry tachodynamy viz. Obr. 18 pracují na principu indukčního zákona. Stator tachodynamy je tvořen permanentním magnetem. Uvnitř statoru se otáčí rotor s vinutí vyvedeným na komutátor. Z kartáčů pak odebíráme stejnosměrné napětí úměrné rychlosti. Přesnost měření tachodynamy je přibližně 2% z celého rozsahu.[20]



Obr. 18 Stejnoseměrné tachodynamo ATAS[20]

Infračervený snímač otáček DS03 Hydrotechnik viz Obr. 19 snímá otáčky pomocí vysílaného infračerveného světla, které se odrazí od reflexních pásek umístěných po obvodu hřídele zpět do snímače. Hodnotě otáček odpovídá počet odrazů světla nalepených od reflexních pásek zachycených snímačem. Tento snímač je vybaven frekvenčním výstupem, proto lze také připojit k vyhodnocovacímu zařízení Hydrotechnik. Jeho měřicí rozsah činí 1 až 10000 min⁻¹ s přesností ± 1 min⁻¹. [18]



Obr. 19 Infračervený snímač otáček DS03 Hydrotechnik[18]

2.5 Měření krouticího momentu a výkonu

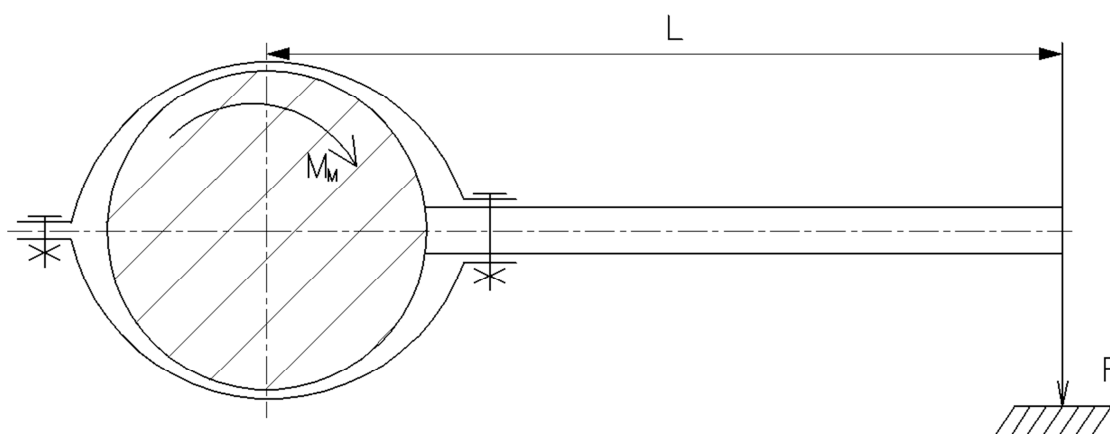
Moment síly určujeme součinem síly F a vzdálenosti R_d podle tohoto vztahu.

$$M = F \cdot R_d \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (2.1)$$

U rotačních pneumatických motorů měříme krouticí moment na vyvedené hřídeli z motoru.

Působením momentu síly (krouticího momentu) vzniká na hřídeli deformace, kterou lze změřit tenzometrem nebo snímačem výchylky. Snímače momentu síly využívají změny magnetických vlastností deformačního členu.[3]

Jednoduchý způsob pro zjištění krouticího momentu pneumatického motoru je pomocí vyvažování jeho statoru. Pomocí objímek umístěných na výstupní hřídel pneumatického motoru lze vyvést páku, která bude působit určitou silou při práci pneumatického motoru. Při použití váhy lehce zjistíme velikost působící síly a následně po vynásobení vzdálenosti páky můžeme určit krouticí moment viz Obr. 20.



Obr. 20 Vyvažování statoru pneumatického motoru

Výpočet krouticího momentu

$$M_M = F \cdot L \quad (2.2)$$

Při výpočtu krouticího momentu je nutné odečtení hmotnosti páky od celkové naměřené hodnoty. Výslednou hodnotu vynásobíme gravitačním zrychlením a získáme hodnotu působící síly.

Snímač krouticího momentu firmy BURSTER viz Obr 21. vyhodnocující moment pomocí změny magnetického pole. Nulovému krouticímu momentu odpovídá napětí 2,5 V. Řada snímačů 8646 snímá krouticí moment v rozsahu od 0 do 2,5 Nm až od 0 do 500 Nm při maximálních otáčkách 1000 min^{-1} a s přesností 1%. Elektrické připojení je realizováno 5-ti pólovým konektorem.[21]



Obr. 21 Snímač krouticího momentu BURSTER 8646[21]

Pro měření výkonu postačí použít vhodnou kombinaci elektrického snímače momentu a otáček v paralelní spojených do elektrického obvodu. Výsledkem součinu momentu M a otáček n je výkon P . [1]

2.6 Vyhodnocení veličin

Vyhodnocovací zařízení Multi-systém Hydrotechnik viz Obr. 22 (5000 a 5050) obsahuje čtyři analogové a dva frekvenční vstupy. K analogovým vstupům lze připojit snímače s analogovým výstupem (např. snímače tlaku, teploty, napětí). Frekvenční vstupy umožňují připojení snímačů s frekvenčním výstupem jako je například snímač otáček. Při měření lze sledovat měřené veličiny na displeji měřicího přístroje. Po připojení snímačů je nutné nastavit rozsahy snímačů a jejich nulový bod. Některé inteligentní snímače mají rozsah nastavený automaticky, ale lze měřit pouze snímačem M 5050. [18]



Obr. 22 Multi-systém Hydrotechnik a) M 5000 b) M 5050[18]

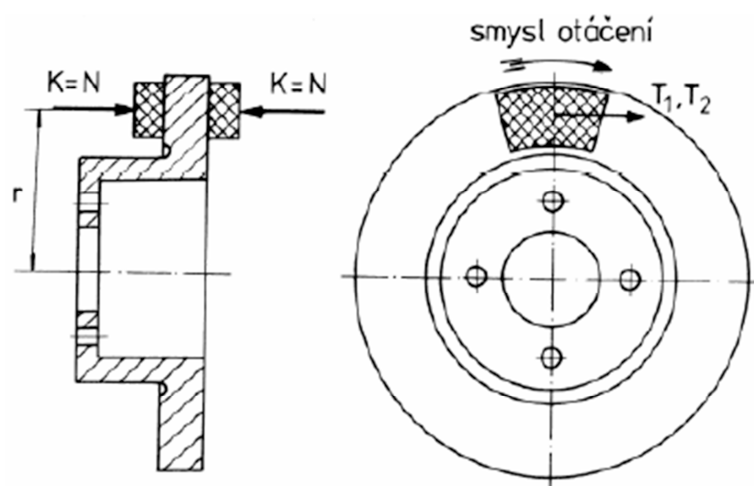
Multi-systém Hydrotechnik (5000 a 5050) zaznamenává měřené veličiny do vlastní paměti přístroje. Nastavit se musí jak doba měření, tak interval snímání. Nejkratší možný interval snímání veličiny je 1 ms. Pomocí USB je možné převést naměřená data do PC, následně data můžeme dále zpracovávat v programu Hydrotechnik. Tento program musí být nainstalován k příslušnému snímači. V příslušném software je možné data zobrazit v tabulkové podobě a provedení jednoduché statistiky. Data z tabulky lze převést do prostředí MS Excel, kde je možné tyto data dále analyzovat.[18]

3 Přehled možných brzdících systémů a konkrétně pro parametry

3.1 Třecí kotoučové brzdy

Jsou používány zejména u silničních motorových vozidel. Při brzdění třecích brzd. Ke tření dochází mezi otáčející částí a pevnou částí. Pohybová energie se tímto přeměňuje v teplo. Mezi nejčastěji používané třecí brzdy patří brzdy bubnové a kotoučové.[4]

Kotoučové brzdy se skládají z kotouče a desek s třecím obložením. Otáčející částí je kotouč a jeho boky tvoří třecí část. Při brzdění jsou třecí plochy s obložením přitlačovány na třecí plochy kotouče. Brzdný moment M_B lze vypočítat ze součinu středního poloměru r , třecího obložení a třecích sil T_1 a T_2 z přitlačného obložení viz Obr. 23. Třecí brzdy jsou konstruovány na brzdění různě velkých výkonů v rozsahu otáček od 0 do 1200 min^{-1} při běžném provozu osobních automobilů. Kontrola velikosti otáček byla ověřena výpočtem, ovšem tento výpočet není součástí diplomové práce.[4]



Obr. 23 Schéma třecí kotoučové brzdy[18]

Brzdný moment

$$M_B = (T_1 + T_2) \cdot r \quad (3.1)$$

Příklad výpočtu hydraulické třecí kotoučové brzdy používané v automobilovém průmyslu. Pro průměr kotouče $d = 268 \text{ mm}$, hydrostatický tlak $p = 11 \text{ MPa}$, plocha pístu $S_k = 1,13 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, účinnosti kolového válce $\eta_k = 0,95$ a brzdného součinitele $c^* = 0,85$.

Ovládací síla soustavy

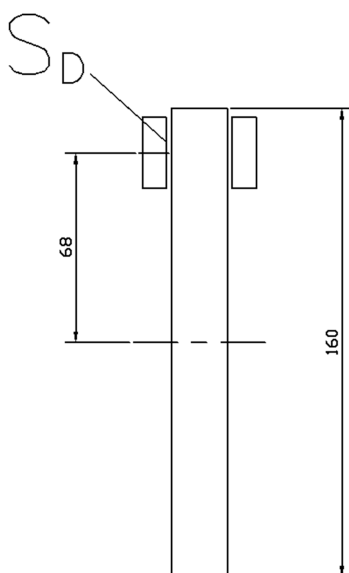
$$K = p \cdot S_k \cdot \eta_k = 11 \cdot 10^6 \cdot 1,13 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 = 11851,5 \text{ N}$$

Brzdňý moment

$$M_B = c^* \cdot 2 \cdot r_B \cdot K = 0,85 \cdot 2 \cdot 0,134 \cdot 11851,5 = 2700 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Z výpočtu je zřejmé, že hydraulická třecí brzda pneumatický motor s krouticím momentem 2 Nm ubrzdí. Třecí kotoučovou brzdou je možné použít pro zadaný pneumatický motor, jelikož splňuje všechny požadavky k jeho ubrzdění.

Kotoučové třecí brzdy jsou používány také v cyklistice, ale pouze pro malé výkony a nízké otáčky cca 200 min^{-1} při rychlosti 25 kmh^{-1} . Některé rotační pneumomotory mají tak malý výkon, že mohou být bez problémů touto třecí brzdou ubrzděny. Problém však nastane při dosažení maximálních otáček pneumatického motoru, kdy tyto činí až 1000 min^{-1} . Dlouhodobé brzdění při těchto otáčkách způsobuje poškození obložení destiček v důsledku vysoké teploty. Z těchto důvodů není možné tyto brzdy použít při zkoušení rotačních pneumatických motorů.



Obr. 24 Schéma hydraulické třecí kotoučové brzdy

Příklad výpočtu hydraulické třecí kotoučové brzdy používané v cyklistice. Průměr kotouče $d = 160 \text{ mm}$ hydrostatický tlak $p = 11 \text{ MPa}$, plocha pístu $S_k = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$, účinnosti kolového válce $\eta_k = 0,95$ a brzdného součinitele $c^* = 0,85$.

Ovládací síla soustavy

$$K = p \cdot S_k \cdot \eta_k = 11 \cdot 10^6 \cdot 7,85 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 = 820,3 \text{ N}$$

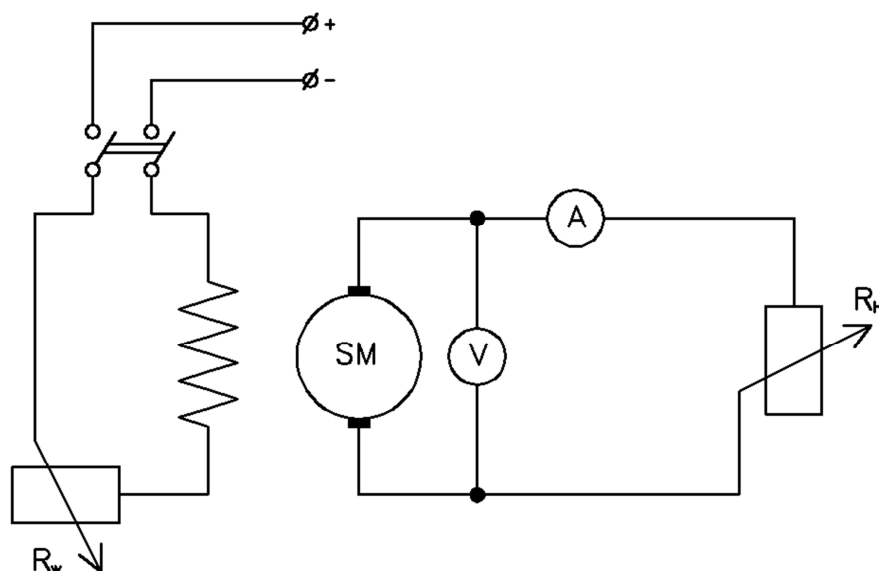
Brzdný moment

$$M_B = c^* \cdot 2 \cdot r_B \cdot K = 0,85 \cdot 2 \cdot 0,068 \cdot 820,3 = 94,8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Z výpočtu je zřejmé, že hydraulická třecí brzda ubrzdí pneumatický motor s krouticím momentem 2 Nm. Z důvodu vysokých otáček tohoto motoru není možné jeho použití.

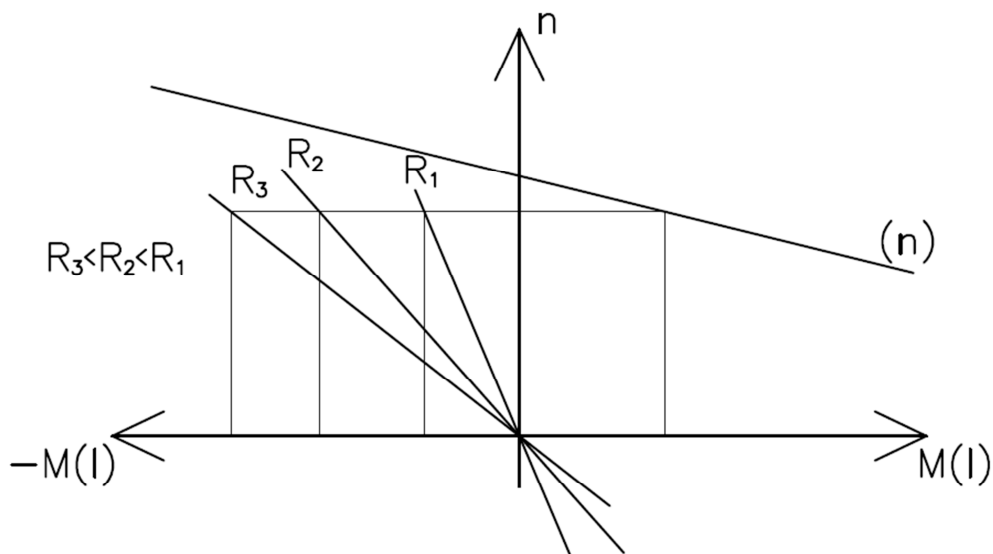
3.2 Brzdění stejnosměrným derivačním motorem

Brzdění stejnosměrným derivačním motorem do odporu probíhá, když motor pracuje v generátorickém stavu. Na výstupních svorkách motoru vzniká indukované napětí U , které teče na odpor. Snižováním elektrického odporu kotvy R_H motoru pomocí reostatu připojeného na motor je zvyšován krouticí moment M_k viz Obr. 26.



Obr. 24 Schéma zapojení stejnosměrného motoru[14]

(SM- stejnosměrný elektromotor, A- ampérmetr, V- volt metr, R_H - odpor kotvy, R_W - budící odpor)



Obr. 26 Charakteristika brzdění motoru do odporu

Výpočet výkonu stejnosměrného elektromotoru

$$P = U \cdot I \cdot \eta \quad (3.2)$$

Výpočet proudu stejnosměrného elektromotoru

$$I = \frac{U}{R} \quad (3.3)$$

Výpočet krouticího momentu stejnosměrného elektromotoru

$$M_k = \frac{P}{\omega} \quad (3.4)$$

$$\omega = 2\pi \cdot n \quad (3.5)$$

Při generátorické práci stejnosměrného elektromotoru bez zatížení dosahuje tento elektromotor maximálních otáček n_{max} . Na výstupních svorkách stejnosměrného elektromotoru je maximální indukované napětí, které je přivedeno k reostatu. Do obvodu je připojen ampérmetr, který umožňuje sledování hodnoty proudu I . Překročením kritické hodnoty proudu I vzniká teplota, která vážně ohrožuje vinutí motoru. Při snížení otáček stejnosměrného elektromotoru se sníží napětí U , aby bylo dosaženo požadovaného krouticího momentu M_k , je nutné snížit elektrický odpor kotvy R_H motoru pomocí reostatu.[14]

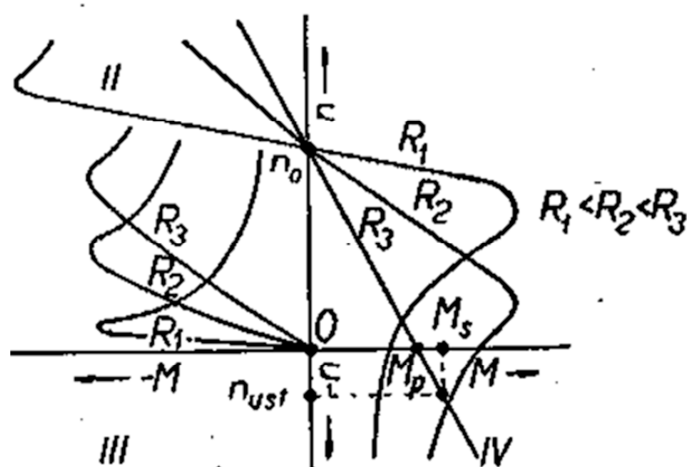
Stejnoseměrný motor s permanentními magnety ATAS P2SZ467 je vhodný pro brzdění zadaného pneumatického motoru z důvodu jeho příznivých parametrů. Jeho výkon činí 250 W a otáčky 3000 min^{-1} viz Obr 27. Stejnoseměrné motory s podobnými parametry vyrábí i spousta dalších firem.[20]



Obr. 27 Stejnoseměrný motor s permanentními magnety ATAS P2SZ467[20]

3.3 Brzdění asynchronním motorem

Při brzdění protiproudem je zapotřebí zvýšení brzdného momentu a omezit proud pomocí přídavného odporu R viz Obr. 28. Při ustáleném chodu odpovídá R_3 ustálenému stavu v bodě n_{ust} , M_s viz Obr. 28. R_1 a R_2 ustálenému stavu neodpovídají. Při přepojení dvou fází ve vinutí statoru se změní směr rotace magnetického pole. Rotor se začne otáčet proti směru magnetického pole, čímž zajišťuje brzdění. Když se motor začne blížit k nulovým otáčkám, je nutné jej odpojit od zdroje, aby motor nepřešel do motorického stavu.[7]



Obr. 28 Momentové charakteristiky asynchronního motoru při různých pracovních oblastech[7]

Dalším způsobem brzdění asynchronního motoru je dynamické brzdění. U dynamického brzdění motorů s kotvou nakrátko a malým výkonem se používá brzdění samobuzením. Asynchronní motor pracuje v generátorickém stavu, ke statoru se připojí kondenzátorové baterie, které motoru dodávají magnetizační proud. Při určitých otáčkách motor vyrobenou energii převádí v teplo do rotorového obvodu. Při brzdění jednofázovým motorem je připojen ke statoru jen jeden kondenzátor viz Obr. 29.[7]

Pro brzdění zadaného motoru je vhodný jednofázový asynchronní motor s trvale připojeným magnetem viz obr. 30. Parametry tohoto motoru se přibližně shodují se zadaným pneumomotorem. Výkon motoru činí 180 W a otáčky 1430 min^{-1} .[20]

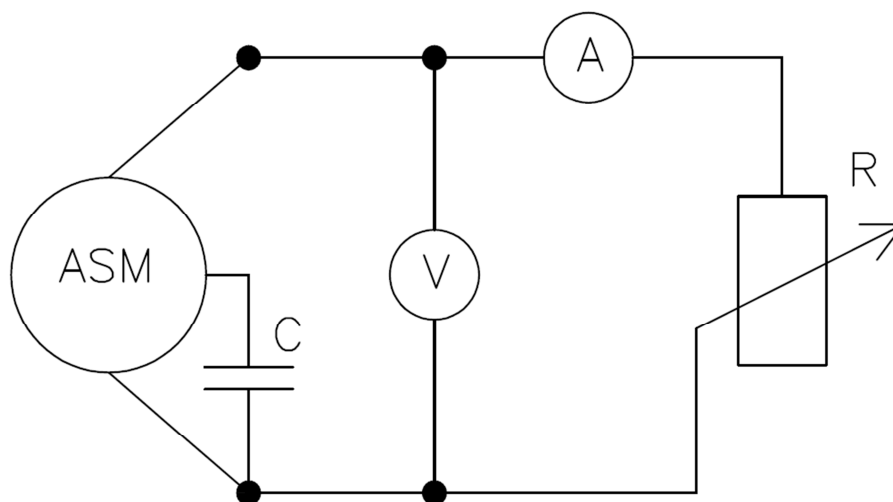
Výpočet pro výkonu jednofázového asynchronního elektromotoru

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \eta \quad (3.6)$$

Výpočet krouticího momentu jednofázového asynchronního elektromotoru

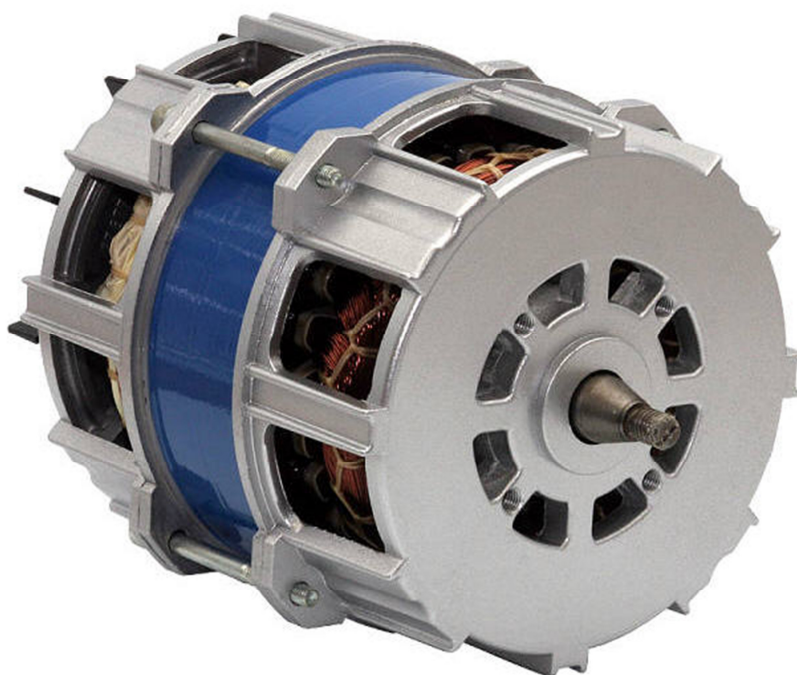
$$M_k = \frac{P}{\omega} \quad (3.7)$$

$$\omega = 2\pi \cdot n \quad (3.8)$$



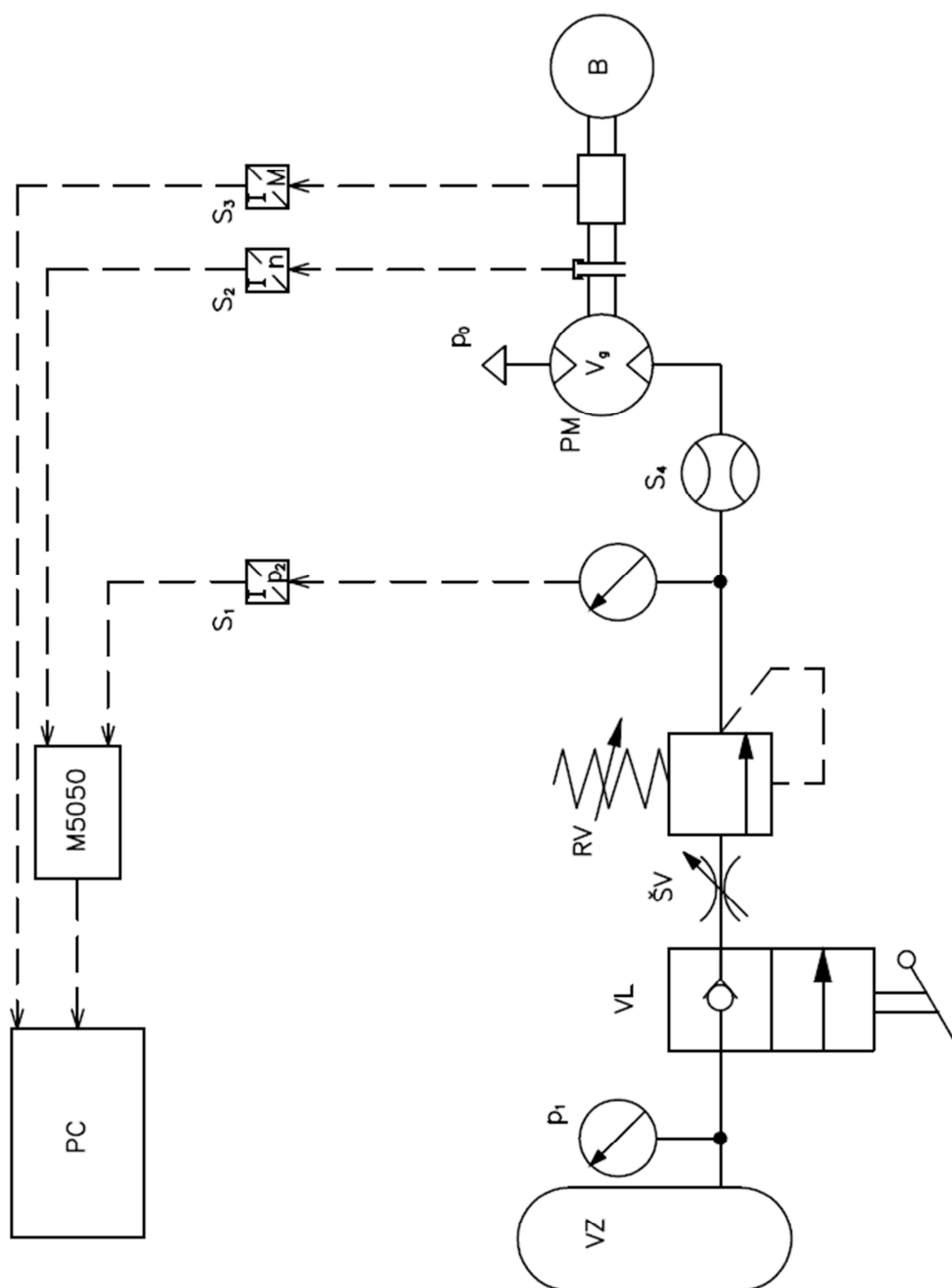
Obr. 29 Schéma zapojení jednofázového asynchronního elektromotoru

(ASM- Jednofázový asynchronní elektromotor, A- ampérmetr, V- volt metr, R- reostat, C- kondenzátor)



Obr. 25 Jednofázový asynchronní motor s trvale připojeným kondenzátorem ATAS J42XO469[20]

4 Metodika měření statických charakteristik pneumomotoru: momentu výkonu spotřeby a měrné spotřeby na otáčkách motoru

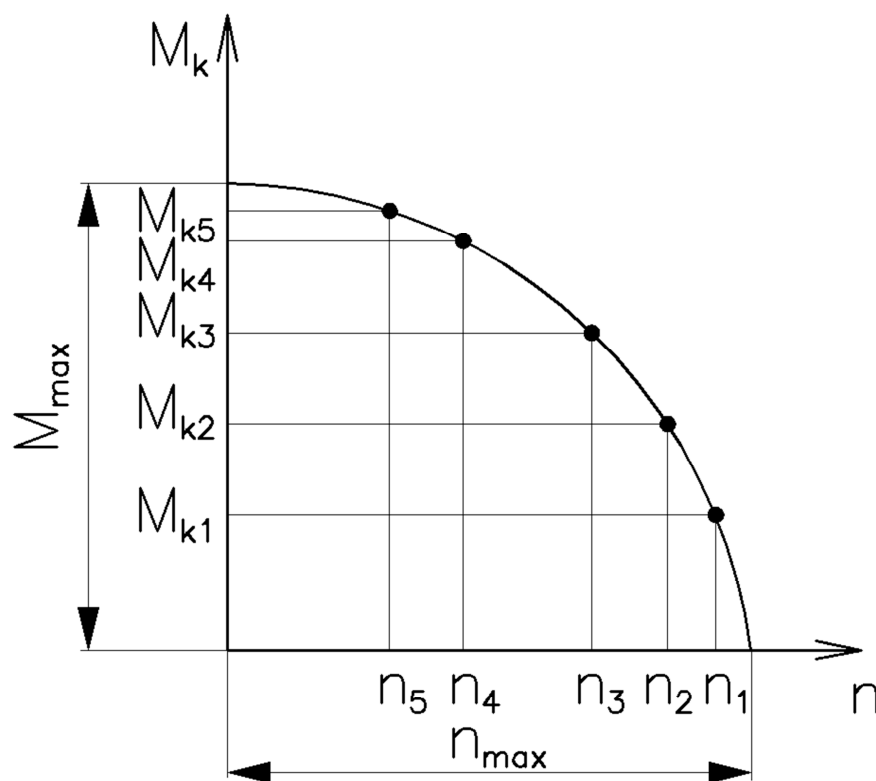


Obr. 31 Schéma zkušebního zařízení pro všeobecné měření charakteristik pneumatického pístového pneumomotoru

VZ	vzdušník
RV	redukční ventil
VL	ručně ovládaný ventil
ŠV	škrťací ventil
PM	pneumatický motor
V_g	geometrický objem pneumatického motoru
p_1	manometr
S_1	snímač tlaku
S_2	snímač otáček
S_3	snímač momentu
S_4	snímač průtoku
B	brzda
M5050	vyhodnocovací zařízení
PC	počítač

4.1 Metodika měření statické charakteristiky pneumomotoru momentu v závislosti na otáčkách

Závislost momentu na otáčkách je možné zjistit pomocí přímé metody, kdy jsou odečítány naměřené hodnoty z příslušných snímačů. Nastavení otáček je nutné provést pomocí škrtícího ventilu ŠV, který umožňuje regulaci průtoku stačeného vzduchu v pneumatickém obvodu. Hodnota otáček lze odečíst z displeje vyhodnocovacího zařízení M5050, který je připojen ke snímači otáček S_2 . Snímač momentu S_1 , který je připojen k PC umožňuje odečtení hodnoty krouticího momentu. Při změně hodnoty otáček dojde i ke změně momentu. Z naměřených hodnot lze sestavit závislost momentu na otáčkách pomocí vhodného software viz Obr. 32.



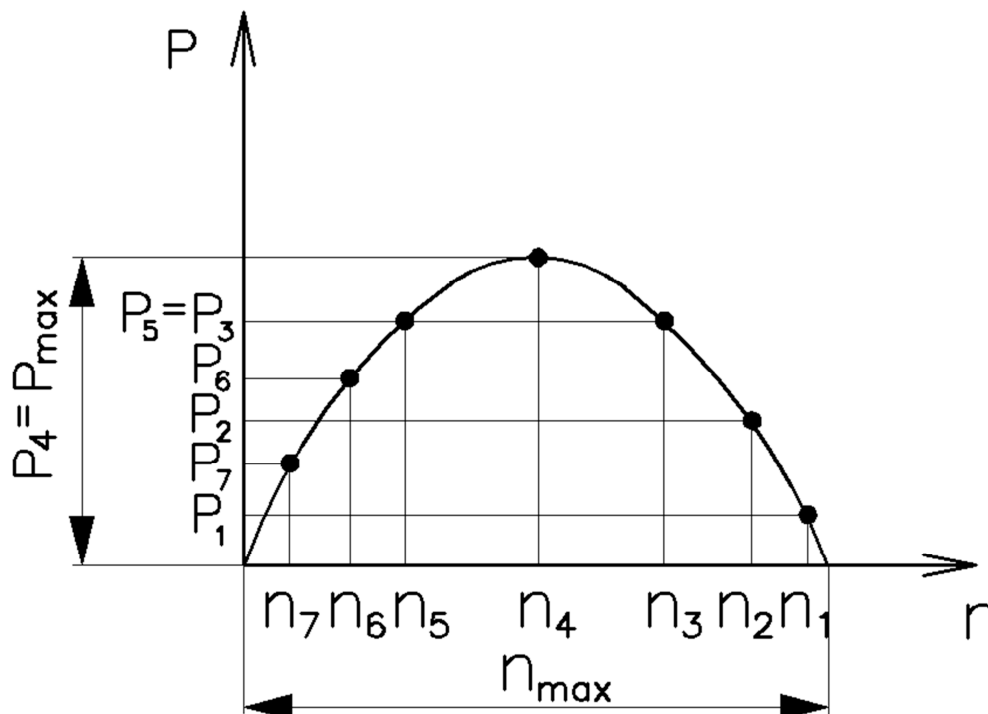
Obr. 32 Teoretická momentová charakteristika pneumotického motoru

4.2 Metodika měření statické charakteristiky pneumomotoru výkonu v závislosti na otáčkách

Výkonovou závislost na otáčkách lze získat nepřímo pomocí výpočtu výkonu viz vzorec (4.1). Snímání otáček zůstává stejné jako v kapitole 4.1. Při snižování otáček pomocí vytváření zátěže brzdou B se mění i hodnota výkonu. Z těchto hodnot se pomocí vhodného software vyhodnotí výkonová charakteristika závislou na otáčkách viz Obr. 33.

Výpočet výkonu

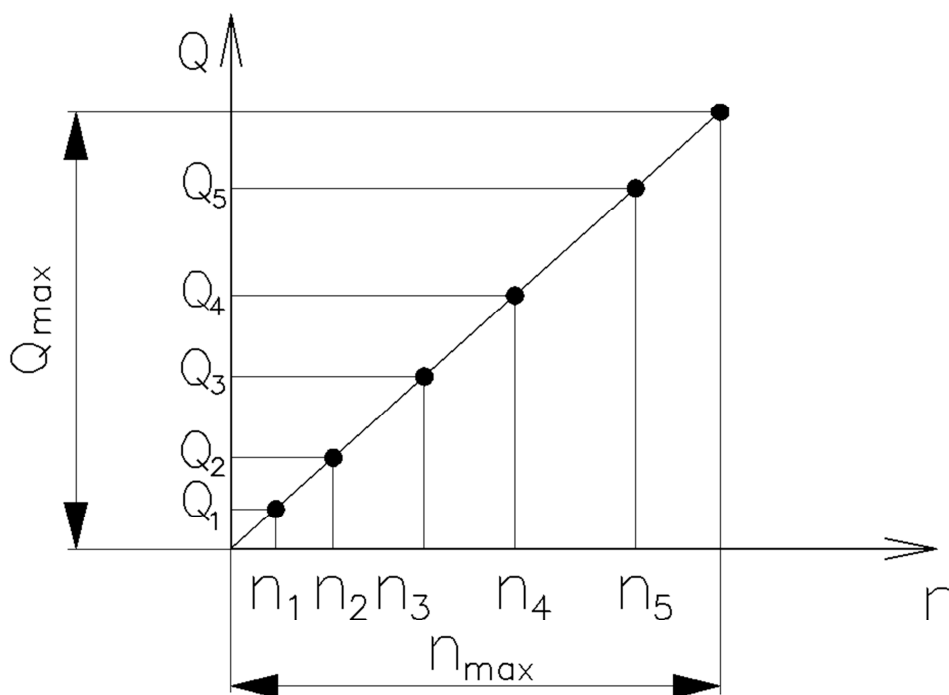
$$P = M_k \cdot 2\pi n \quad (4.1)$$



Obr. 33 Teoretická momentová charakteristika pneumatického motoru

4.3 Metodika měření statické charakteristiky pneumomotoru spotřeby vzduchu v závislosti na otáčkách

Spotřebu vzduchu je možné odečíst pomocí snímače S_4 , který je připojen před vstupem do pneumomotoru. Při poklesu otáček klesne i spotřeba vzduchu. Otáčky lze odečíst přímo z vyhodnocovacího zařízení 5050, které je připojeno k obvodu stejně jako v předchozích kapitolách 4.1 a 4.2. Z těchto naměřených hodnot a pomocí vhodného software lze vyhodnotit závislost spotřeby vzduchu na otáčkách viz Obr. 34.



Obr. 34 Teoretická průtoková charakteristika pneumatického motoru

4.4 Metodika měření statické charakteristiky pneumomotoru měrné spotřeby vzduchu v závislosti na otáčkách

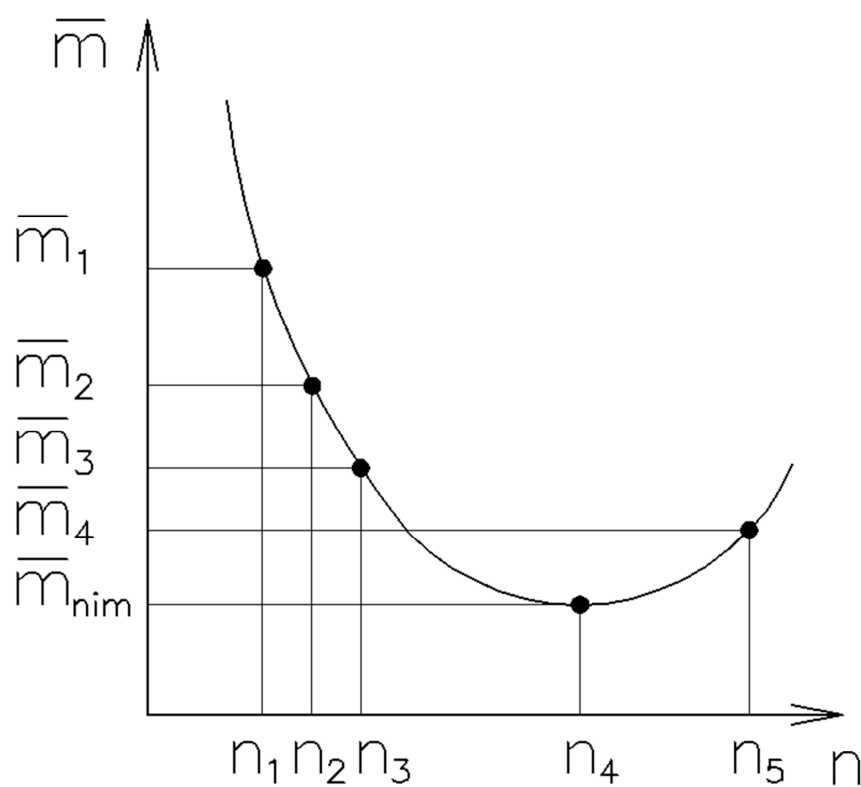
Měření charakteristiky měrné spotřeby vzduchu v závislosti na otáčkách spočívá v odečítání hodnot z průtokoměru S_4 při určitých otáčkách. Tyto hodnoty je nutno převést na normální podmínky a tyto podělit výkonem motoru viz vzorec (4.3). Tím získáme hodnoty měrné spotřeby vzduchu motoru. Výkon motoru získáme stejným způsobem jako v kapitole 4.1. Z naměřených a vypočítaných hodnot je sestrojena charakteristika ve vhodném software viz Obr. 35.

Výpočet průtoku v normálních podmínkách

$$Q_{MN} = \frac{p_2}{p_0} \cdot Q \quad (4.2)$$

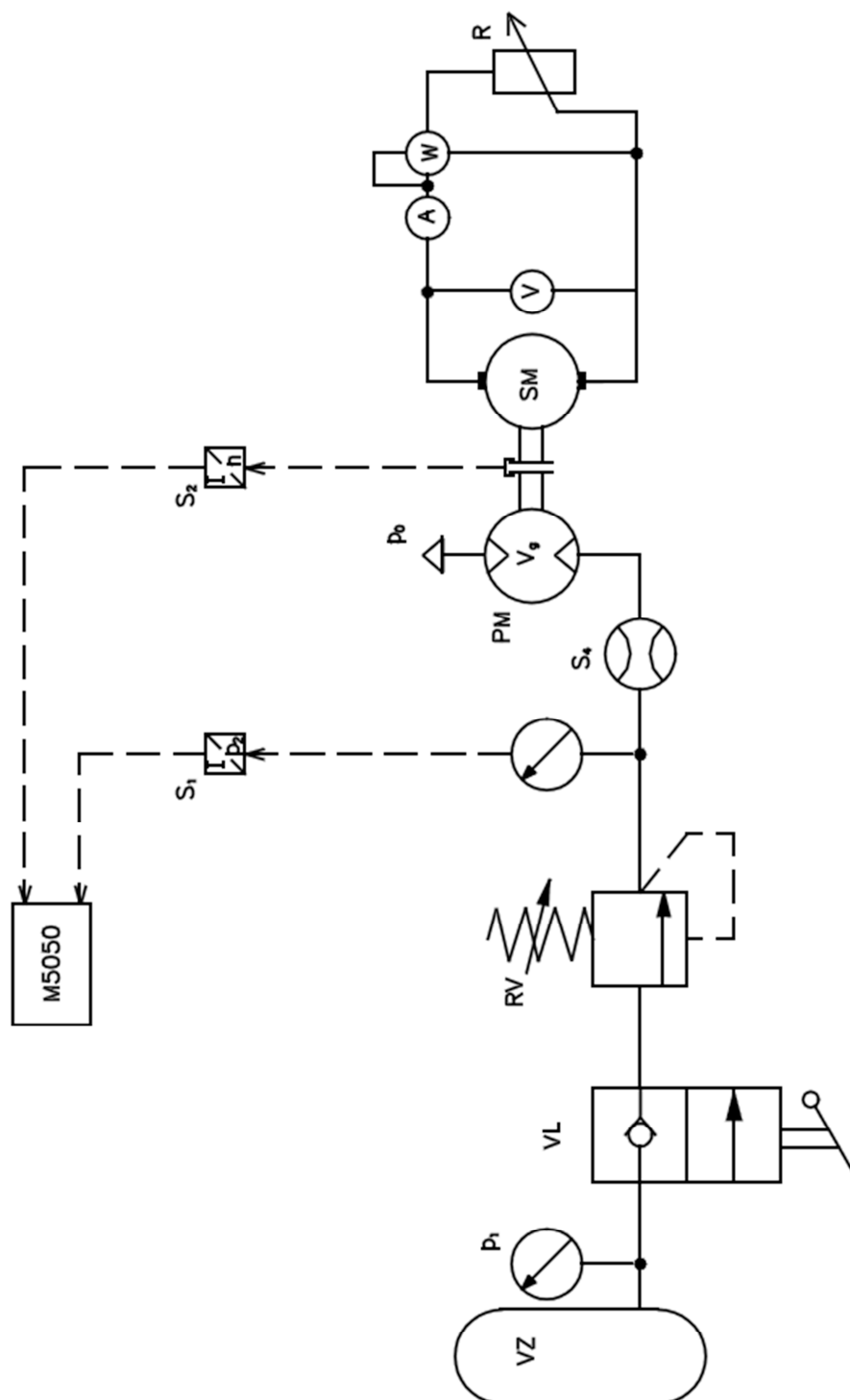
Výpočet měrné spotřeby vzduchu motoru

$$\bar{m} = \frac{Q_{MN}}{P} \quad (4.3)$$



Obr. 35 Teoretická charakteristika měrné spotřeby pneumatického motoru

5 Projekt zkušebního zařízení pro dané parametry a velikost motoru



Obr. 36 Schéma zkušebního zařízení

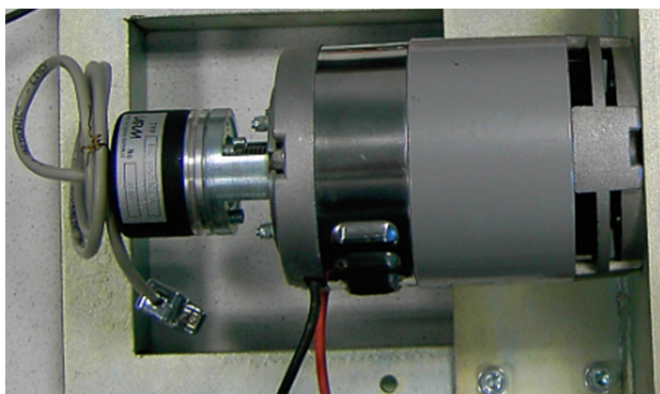
Specifikace prvků zkušebního zařízení

VZ	vzdušník o objemu 0,474 m ³
RV	redukční ventil FESTO LR-1/85
VL	ručně ovládaný ventil SMC VHK3 2/2
PM	pneumatický pístový motor PARKER P1V-P012B01800
V_g	geometrický objem pneumatického motoru
p_1	manometr SMC řady ISE40A
S_1	snímač tlaku PR 15 Hydrotechnik
S_2	snímač otáček DS03 Hydrotechnik
S_4	snímač průtoku Ifm Elektronik SD6000
SM	stejnoseměrný motor s permanentními magnety ATAS P2SZ467
M5050	vyhodnocovací zařízení <i>Multi-systém Hydrotechnik M 5050</i>
A	ampérmetr
V	voltmetr
R	reostat
W	měřič výkonu

Popis zkušebního zařízení

Vzdušník VZ je kompresorem natlakován na přetlak 0,6 MPa, který má na výstupu redukční ventil RV, pomocí kterého lze nastavit konstantní tlak, při kterém bude měření prováděno. Tlak ve vzdušníku je kontrolován pomocí manometru p_1 SMC řady ISE40A. Velikost otáček pneumatického motoru závisí na průtoku. Manometrem p_1 je sledován tlak ve vzdušníku. Ručně ovládaný ventil VL slouží k okamžitému odpojení přívodu stlačeného vzduchu z pneumatického obvodu. Za redukčním ventilem je umístěn snímač tlaku PR 15 Hydrotechnik, který je připojen na výstupu k vyhodnocovacímu zařízení Multi-systém Hydrotechnik M 5050. Na displeji vyhodnocovacího zařízení Multi-systém Hydrotechnik M 5050 lze sledovat okamžitý tlak v daném obvodu. Dále je do obvodu zakomponován snímač průtoku Ifm Elektronik SD6000 vybavený displejem zobrazujícím okamžitý průtok. Poslední částí pneumatického obvodu je připojený PM PARKER P1V-P012B01800 a na vstup do tohoto PM je zaveden konstantní tlak, který pneumatický motor pohání. Nastavení otáček PM je zajištěno pomocí redukčního ventilu RV umístěného v obvodu. Na výstupní hřídeli PM je umístěna spojka spojující PM a stejnosměrný motor SM. Spojka je opatřena reflexními pásy, které umožňují snímání otáček snímačem DS03 Hydrotechnik S_2 . Tento snímač je

taktéž připojen k vyhodnocovacímu zařízení Multi-systém Hydrotechnik M 5050 umožňující zobrazování okamžitých otáček na displeji tohoto zařízení. Stejnosměrný motor SM vytváří brzdny moment na PM, ke kterému dochází za pomoci snižování elektrického odporu v elektrickém obvodu. Pokles elektrického odporu je zajišťován reostatem R umístěným v elektrickém obvodu. Snižováním elektrického odporu se stejnosměrný motor SM chová jako brzda, která vytváří brzdny moment na výstupní hřídeli SM a tím vytváří zátěž na PM. Se snižující se hodnotou elektrického odporu se zvyšuje brzdny moment. Součástí vybavení elektrického obvodu je i ampérmetr A a voltmetr V. Tyto měřiče zajišťují měření a zobrazení velikosti proudu I a napětí U, nedílnou součástí elektrického obvodu je měřič výkonu. Z katedry elektroniky bylo poskytnuto zařízení k regulaci odporu ve stejnosměrném motoru. Zařízení obsahuje vestavěné měřiče proudu, napětí i výkonu viz Obr. 38, hodnoty těchto veličin lze odečítat z displeje. Katedra elektroniky také zapůjčila stejnosměrný elektromotor viz Obr. 37. Parametry stejnosměrného elektromotoru činí výkon 400W, proud 20A, napětí 24V a jmenovité otáčky 2800 min^{-1} . V pneumatickém obvodu jsou všechny ztráty ve vedení zanedbány na základě malé vzdálenosti vedení stlačeného vzduchu.



Obr. 37 Stejnosměrný elektromotor



Obr. 38 Měřič výkonu, proudu i napětí

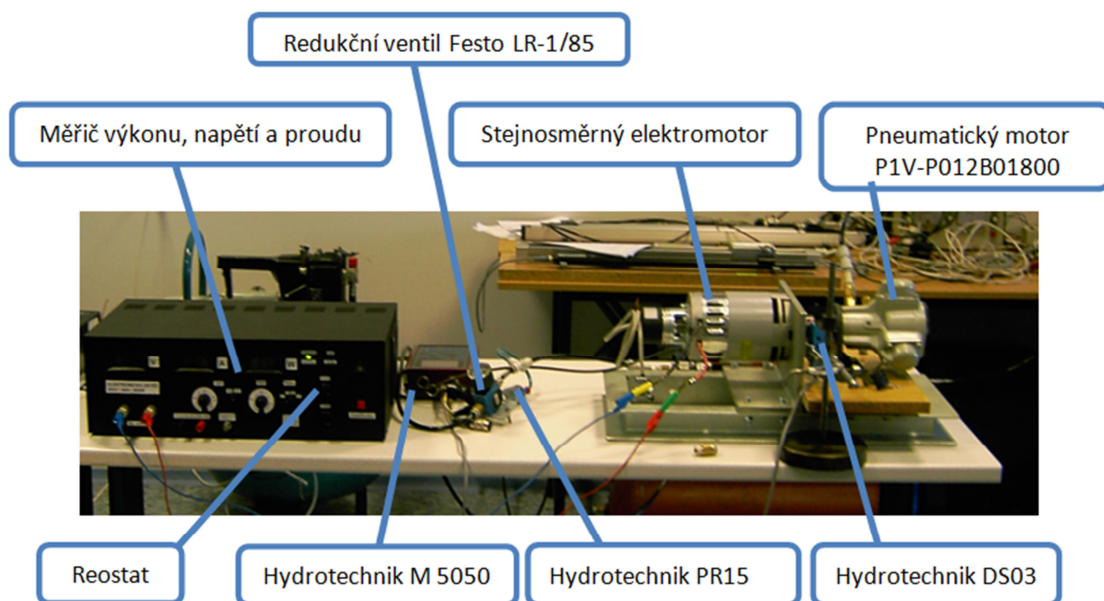
Krouticí moment se vypočítá pomocí rovnice č. 5.1 na základě vypočítaných hodnot, hodnot odečtených a hodnot použitých snímačů.

$$M_k = \frac{P}{2\pi n} \quad (5.1)$$

Všechny získané hodnoty se postupně zapíší do tabulky a následně analyzují pomocí vhodného software např. Microsoft Excel.

5.1 Experimentální měření

Experimentální měření proběhlo v pneumatické laboratoři, kde bylo složeno zkušební zařízení viz Obr. 39. Měření provedené při konstantním tlaku a nastavených otáčkách pomocí redukčního ventilu. Při zatěžování pneumatického motoru byly odečteny a vypočteny všechny potřebné parametry a následně zapsány do určené tabulky. Všechny charakteristiky pneumatického motoru byly analyzovány v programu Excel. Charakteristiky pneumatického motoru byly realizovány pro tři hodnoty konstantního tlaku viz Tabulky 4 až 6.



Obr. 39 Zkušební zařízení sestavené v laboratoři

Tab. 4 Tabulka hodnot pro konstantní tlak 0,964 bar

	Otáčky	Proud	Napětí	Výkon	Moment	Průtok
	n [min ⁻¹]	I [A]	U [V]	P [W]	M [N.m]	Q [l.min ⁻¹]
1	1200	0	8,6	0	0	96
2	1140	0,2	8,3	1	0,008377	92
3	1020	1	7,1	7	0,065534	86
4	904	1,6	6	10	0,105634	80
5	745	2,7	4,7	12	0,153814	70
6	555	3,9	3,1	11	0,189265	59
7	425	4,9	1,9	8	0,179751	48
8	408	5,1	1,7	8	0,187241	45
9	355	5,4	1,4	7	0,188296	39
10	300	6	0,8	4	0,127324	33
11	0	0	0	0	?	0

Výpočet výkonu

$$P_{vyp} = V_g \cdot n \cdot p = 43,73 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{745}{60} \cdot 96400 = 52,32 \text{ W}$$

Výpočet celkové účinnosti

$$\eta_c = \frac{P_{měř}}{P_{vyp}} = \frac{12}{52,32} = 0,23$$

Tab. 5 Tabulka hodnot pro konstantní tlak 0,836 bar

	Otáčky	Proud	Napětí	Výkon	Moment	Průtok
	n [min ⁻¹]	I [A]	U [V]	P [W]	M [N.m]	Q [l.min ⁻¹]
1	1000	0	7,1	0	0	80
2	990	0,2	6,9	1	0,009646	77
3	795	1,4	5,2	7	0,084082	67
4	700	1,9	4,6	8	0,109135	63
5	610	2,7	3,6	10	0,156546	56
6	520	3,4	2,8	9	0,165276	50
7	410	4,2	1,8	7	0,163037	42
8	294	5	0,9	3	0,097442	31
9	280	5,3	0,8	3	0,102314	30
10	0	0	0	0	?	0

Výpočet výkonu

$$P_{vyp} = V_g \cdot n \cdot p = 43,73 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{610}{60} \cdot 83600 = 37,16 \text{ W}$$

Výpočet celkové účinnosti

$$\eta_c = \frac{P_{m\check{r}}}{P_{vyp}} = \frac{10}{37,16} = 0,27$$

Tab. 6 Tabulka hodnot pro konstantní tlak 0,568 bar

	Otáčky	Proud	Napětí	Výkon	Moment	Průtok
	n [min ⁻¹]	I [A]	U [V]	P [W]	M [N.m]	Q [l.min ⁻¹]
1	600	0	4,2	0	0	45
2	570	0,2	4	1	0,016753	40
3	505	0,6	3,3	2	0,037819	34
4	465	0,9	3	2	0,041072	33
5	390	1,5	2,3	3	0,073456	30
6	333	1,8	1,8	3	0,08603	27
7	300	2	1,5	2	0,063662	26
8	254	2,3	1,1	2	0,075191	23
9	200	2,7	0,7	1	0,047746	20
10	170	2,9	0,4	1	0,056172	18
11	0	0	0	0	?	0

Výpočet výkonu

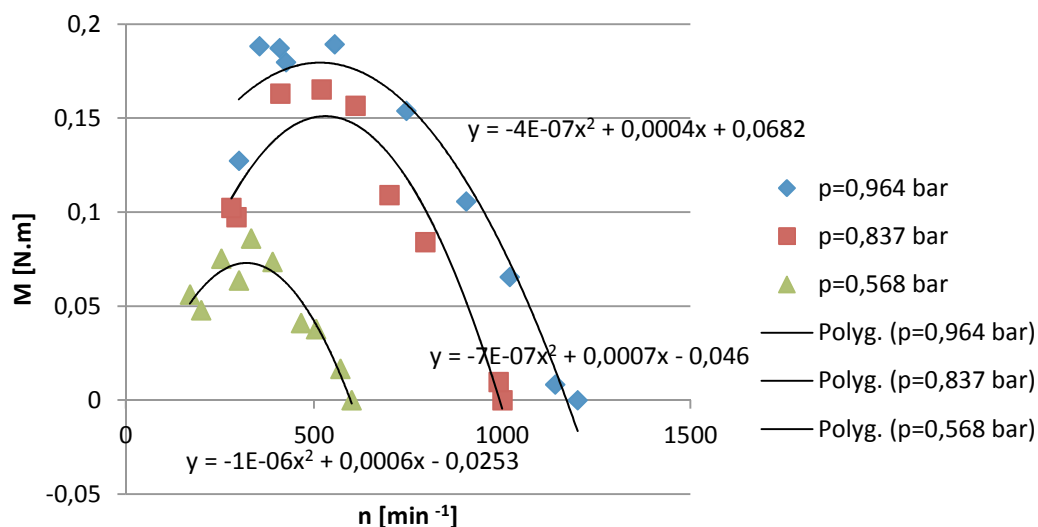
$$P_{vyp} = V_g \cdot n \cdot p = 43,73 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{390}{60} \cdot 56800 = 16,14 \text{ W}$$

Výpočet celkové účinnosti

$$\eta_c = \frac{P_{m\check{r}}}{P_{vyp}} = \frac{3}{16,14} = 0,18$$

Výpočet celkové účinnosti byl získán při práci pístového pneumomotoru PARKER P1V-P012B01800 za konstantního tlaku. Geometrický objem motoru je $V_g = 43,73 \text{ cm}^3$. První řádek hodnot v Tab. 4 - 6 je naměřen v nezatíženém stavu, proto je ve svorkách SM nulový proud i nulový výkon. Zkouška měření při tlaku 3,5 bar a otáčkách 900 min^{-1} se zvedl proud ve svorkách SM na 17,5 A při mírném zatížení. Další zvyšování zátěže by mohlo způsobit poškození SM.

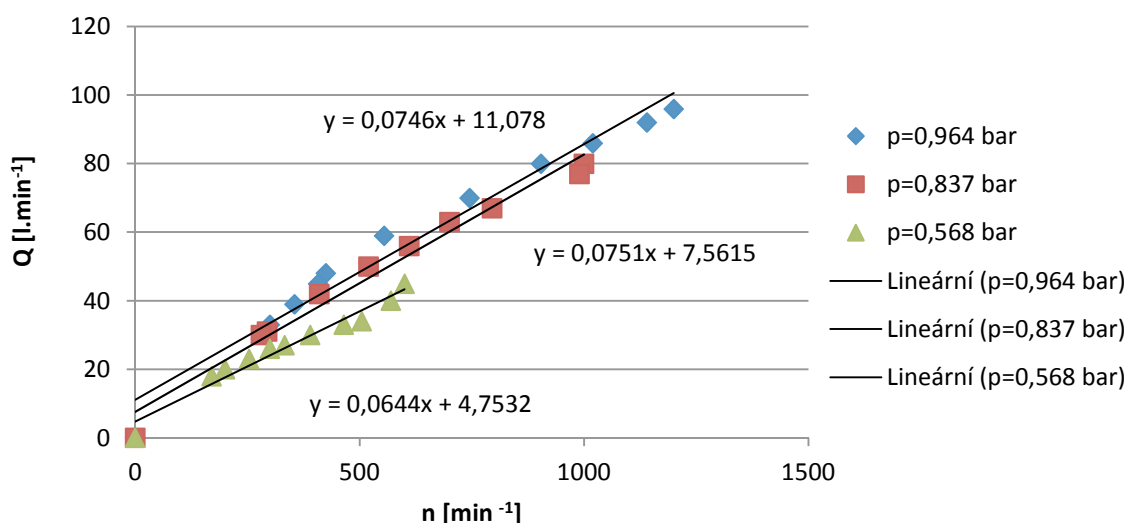
Závislost krouticího momentu na otáčkách



Graf 1 Závislosti krouticího momentu na otáčkách

Graf 1 znázorňuje závislost krouticího momentu na otáčkách. Při brzdění pneumomotoru se zvyšuje krouticí moment a klesají otáčky. V ideálním stavu by tato závislost byla lineární. Čím větší zatížení, tím je vyšší krouticí moment a nižší otáčky. Při experimentálním měření nedošlo k úplnému zabrzdění. Z Grafu 1 je viditelný pokles krouticího momentu při nízkých otáčkách, tento pokles může být ovlivněn mechanickou účinností a účinností poměrného plnění. V sortimentu laboratoře není obsažen snímač krouticího momentu s požadovanou přesností měření, proto jsme moment vypočetli pomocí vzorce 5.1. Měření bylo provedeno při nízkých konstantních tlacích, díky těmto tlakům jsou naměřené hodnoty nižší než v zadání diplomové práce.

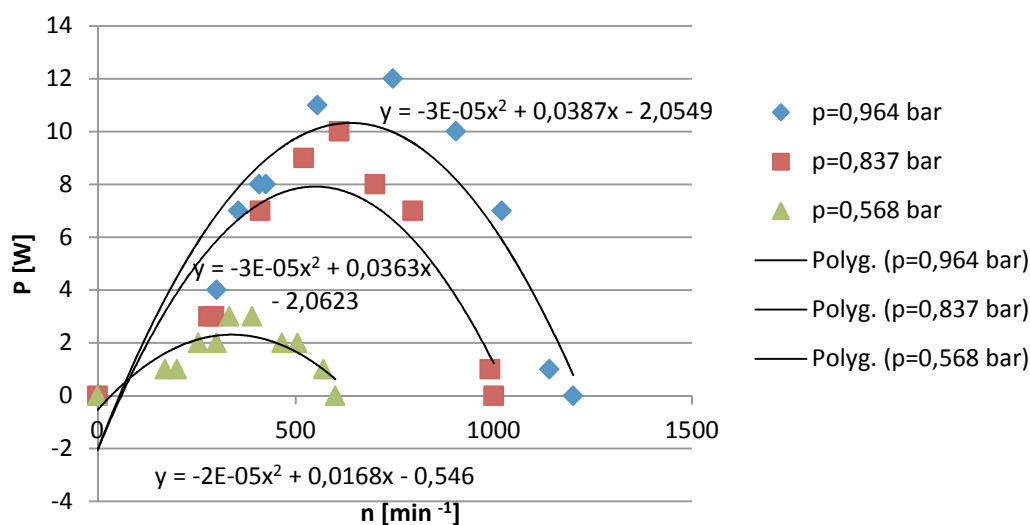
Závislost spotřeby vzduchu na otáčkách



Graf 2 Závislost spotřeby vzduchu na otáčkách

Graf 2 znázorňuje závislost spotřeby vzduchu na otáčkách. Z grafu je patrné, že při vyšších otáčkách se zvýší spotřeba vzduchu. Charakteristika ideálního motoru je sice lineární, ale z důvodu průtokových ztrát mají skutečné charakteristiky nepatrné odchylky. Měření spotřeby vzduchu bylo provedeno pro tři hodnoty konstantních tlaků. Při nižší hodnotě tlaku je i nižší spotřeba, naopak při nejvyšší hodnotě tlaku je spotřeba nejvyšší.

Závislost výkonu na otáčkách



Graf 3 Závislost otáček na výkonu

Graf 3 znázorňuje závislost výkonu na otáčkách. Chodu pneumatického motoru bez zatížení má dle měřiče nulový výkon a maximální otáčky. Postupným zvyšováním zátěže se výkon zvyšuje a klesají otáčky pneumomotoru. Při dalším zvyšování zátěže se dostal výkon na maximum při určitých otáčkách. Po dosažení určitých otáček se začal výkon vlivem nárůstu proudu a poklesu napětí snižovat. Ideální charakteristika pneumomotoru má parabolický průběh. Výchyly v parabolickém průběhu mohou být způsobeny mechanickou účinností PM. Měření bylo provedeno opět pro tři hodnoty konstantního tlaku $p = (0,964; 0,837; 0,586)$ bar. Pneumomotor je konstruován na tlak 5 bar, proto jsou naměřené hodnoty výkonu mnohem menší než parametry motoru v zadání diplomové práce.

Závěr

Cílem diplomové práce byl na základě předběžných výpočtů pneumatického motoru sestavit projekt zkušebního zařízení. Výsledkem diplomové byl návrh zkušebního zařízení pro zjišťování parametrů zadaného pneumatického motoru viz Tab. 3. Součástí návrhu zkušebního zařízení byl výpočet velikosti vzdušníku a výběr vhodných snímačů pro měření parametrů pneumatického motoru. Dále byl vypracován návrh vhodného brzdícího zařízení a současně metodika měření charakteristik. Dodatečné vybavení katedry o pístový pneumatický motor PARKER P1V-P012B01800 o výkonu 0,125 kW, jmenovitých otáček 900 min^{-1} a krouticího momentu 1,37 Nm. Po konzultaci s vedoucím diplomové práce bylo dohodnuto dodatečné pokusné měření parametrů tohoto pneumatického motoru.

V kapitole 5.1 je uvedena skladba pneumatického obvodu, měření a jeho vyhodnocování. Zásadním prvkem zkušebního zařízení byl brzdící elektromotor a měřič jeho proudových, napěťových a výkonových hodnot. Tato zařízení však neumožňovala přímé měření krouticího momentu mezi pneumatickým motorem a brzdícím elektromotorem. Proto byly hodnoty momentu vypočítány z naměřených z elektrických hodnot proudu napětí a výkonu. Zkušební zařízení ovšem ukázalo, že nebylo možné dosáhnout vyšších pracovních tlaků, protože při vyšším zatěžování pneumatického motoru prudce stoupá proud ve svorkách stejnosměrného elektromotoru. Výsledné grafy naměřených veličin vykazují průběh veličin $M(n)$ a $P(n)$ shodné s průběhy udávanými výrobcí, ovšem pro hodnoty veličin úměrných dosaženému tlaku. Všechny cíle diplomové práce byly splněny.

Zdroje

- [1] KOPÁČEK, Jaroslav. *Pneumatické mechanismy*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2005, 265 s. ISBN 978-80-248-0879-6.
- [2] PIVOŇKA, Josef. *Tekutinové mechanismy: učebnice*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987, 623 s. ISBN 80-010-1947-0.
- [3] JENČÍK, Josef a Ludvík KUHN. *Technická měření ve strojírenství*. Praha: SNTL, 1982. 584s. ISBN 04-223-82
- [4] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel*. 2. vyd. Brno: František Vlk, 2003, 392 s. ISBN 80-239-0026-9.
- [5] MAIXNER, Ladislav. *Mechatronika: učebnice*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2006, 280 s. ISBN 80-251-1299-3.
- [6] LIŠKA, Antonín. *Technika stlačeného vzduchu: učebnice*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1999, 361 s. ISBN 80-010-1947-0.
- [7] ČILIKIN, Michail Grigor'jevič. *Elektrické pohony*. Praha: STNL, 1956. 444s.
- [8] KOPÁČEK, Jaroslav a Miloslav ŽÁČEK. *Pneumatická zařízení strojů*. Ostrava: VŠB-TUO, 2008. 94 s. Fakulta strojní. ISBN 978-80-248-0442-2
- [9] KOPÁČEK, Jaroslav. *Pneumatické motory - jejich možnosti a použití*. Praha: STNL, 1975. Časopis: Strojírenská výroba, č. 3.
- [10] KOPÁČEK, Jaroslav a Miloslav ŽÁČEK. *Cvičení z řízení pneumatických systémů*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004, 93 s. ISBN 80-248-0692-4.
- [11] BALÁTĚ, Jaroslav. *Technické prostředky automatického řízení*. 1. vyd. Praha: Nakl. techn. lit., 1986, 483 s.
- [12] BAŠUS, Vladimír. *Příručka měřicí techniky pro strojírenství a energetiku*. Praha: SNTL, 1965, 928 s.
- [13] ZINĚVIČ, Vladimir Dorofejevič. *Porševyje i sesterennyje pneumedvigateli gorno šachtaobudovanija*. Moskva: Nėdra, 1975.
- [14] BORISENKO, Konstantin Stepanovič. *Pneumatčeskyje dvigatėli*. Uglėtėchizdat, 1958, 201 s.
- [15] PARKER: *Katalog produktů AIR MOTORS*. [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://www.parker.com/portal/site/PARKER/menuitem.7100150cebe5bbc2d6806710237ad1ca/?vgnextoid=f5c9b5bbec622110VgnVCM10000032a71dacRCRD>

- [16] DEPRAG: *Katalog produktů D6200*. [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://www.deprag.com/download/prospekt-pdf/D6200cs.pdf>
- [17] DÜSTERLOH: *Katalog produktů PNEUMATIC MOTOR*. [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: http://www.duesterloh.de/doku/luft/katalog/lm1_004e.pdf
- [18] HYDROTECHNIK: *Katalogy produktů HYDROTECHNIK*. [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://www.hydrotechnik.com/english/html/products.html>
- [19] MAXON: *Katalog produktů MAXON*. [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://www.maxonmotor.com/maxon/view/catalog/>
- [20] ATAS: *Katalog produktů ATAS*. [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: http://www.atas.cz/files/K5A7-00_K10A6-00.PDF
- [21] BUSTER: *Katalog produktů BUSTER*. [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: [http://www.burster.com/en/products/sensors.html?Torque/Rotating applications/8645 8646/29](http://www.burster.com/en/products/sensors.html?Torque/Rotating%20applications/8645%208646/29)
- [22] DATAFLEX: *Katalog produktů DATAFLEX*. [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://www.ktr.com/root/img/pool/pdf/montageanleitungen/49014en000000.pdf>
- [23] TESTO: *Katalog produktů TESTO 6440*. [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: http://www.testoinfo.cz/admin/secobr/tech_data/0555_6441-tech_data.pdf
- [24] SMC: *Katalogy produktů SMC*. [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <https://webshop.smc-cee.com/default.aspx?language=CZ>
- [25] FESTO: *Katalogy produktů FESTO*. [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <https://webshop.smc-cee.com/default.aspx?language=CZ>
- [26] JIHOSTROJ. *Katalogy hydrauliky* [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://www.jihostroj.com/cz/katalog-hydrauliky/>
- [27] Dynamometry - brzdy. *Měřicí přístroje* [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://www.mericipristroje.cz/index.php?soubor=text/dynamometry.html>
- [28] SIEMENS. *Elektromotory* [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://www.elektromotory.net/siemens/1la7-3000-otacek.html>
- [29] SINAMIC. *Nízkonapěťové měniče* [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://www1.siemens.cz/ad/current/index.php?ctxnh=d27889bdc2&ctxp=home>
- [30] TRONIX. *Kapesní váhy* [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://www.tronix.cz/katalog/60/kapesni-vahy/>
- [31] SHIMANO. *Hydraulické kotoučové brzdy* [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://www.mojekolo.cz/komponenty/brzdy-kotoucove/shimano>

- [32] ČSN 10 9005. *Pneumostatické mechanismy*. Česká republika: SAGIT, 1985.
[formacni_tlakomery.htm#obr.4.11](#).

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování vedoucímu mé diplomové práce p. prof. Ing. Jaroslavovi Kopáčkovi, CSc. za odborný výklad na všechny mé otázky a pomoc při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl katedře elektroniky za zapůjčení potřebných prvků pro samotnou realizaci diplomové práce a p Ing. Petrovi Kačorovi, Ph.D. za odborné rady.

V Ostravě 21. května 2012

.....